



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Nuno Miguel Freitas Pacheco

Teste de motor diesel com biocombustíveis

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Jorge José Gomes Martins
Professor Doutor Francisco C. Pimenta de Brito

outubro de 2013

DECLARAÇÃO

Nome: Nuno Miguel Freitas Pacheco

Endereço eletrónico: nunopacheco@live.com.pt

Telefone: 00351 95560103

Número do cartão do cidadão: 11738204

Título dissertação: **Teste de motor diesel com biocombustíveis.**

Orientador (es): Professor Doutor Engenheiro Jorge José Gomes Martins

Professor Doutor Engenheiro Francisco C. Pimenta de Brito

Ano de conclusão: 2013

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Ciclo de Estudos Conducente ao Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Declaro que concedo à Universidade do Minho e aos seus agentes uma licença não-exclusiva para arquivar e tornar acessível, nomeadamente através do seu repositório institucional, nas condições abaixo indicadas, a minha dissertação, no todo ou em parte, em suporte digital.

Declaro que autorizo a Universidade do Minho a arquivar mais de uma cópia da dissertação e a, sem alterar o seu conteúdo, converter a dissertação entregue, para qualquer formato de ficheiro, meio ou suporte, para efeitos de preservação e acesso.

Retenho todos os direitos de autor relativos à dissertação, e o direito de a usar em trabalhos futuros (como artigos ou livros).

Concordo que a minha tese ou dissertação seja colocada no repositório da Universidade do Minho com o seguinte estatuto:

- Disponibilização imediata do conjunto do trabalho para acesso mundial

Universidade do Minho, __ / __ / ____

Assinatura: _____

Aos meus pais e aos meus irmãos, André e Soraia, a quem dedico por inteiro todo o esforço destes anos.

AGRADECIMENTOS

É indubitavelmente pequeno o espaço desta secção para que possa, de forma honrosa, expressar o meu agradecimento a todos quantos, de alguma forma, contribuíram, participaram ou simplesmente acreditaram, tanto na execução do trabalho que aqui se documenta, como em todo o processo formativo que, ao longo dos anos, o precedeu. Deste modo deixo apenas algumas simples palavras, porém revestidas de um grande sentido de reconhecimento e agradecimento, designadamente:

Ao Professor Doutor Jorge Martins, orientador deste projeto, agradeço todos os conhecimentos que me transmitiu, não só no decorrer deste trabalho como em todas as cadeiras que lecionou no decorrer da minha formação académica. Estou-lhe também grato pela disponibilidade, em especial pelo facto de, mesmo quando ausente no estrangeiro, ter estado sempre disponível via e-mail, telefone ou videoconferência.

Ao Professor Doutor Francisco Brito, coorientador deste projeto, agradeço a orientação ao longo deste trabalho, a disponibilidade e ajuda prestadas. Agradeço também toda a paciência e compreensão ao logo dos trabalhos práticos executados no Laboratório de Motores, em especial durante a realização dos ruidosos testes. Como não podia deixar de ser, agradeço também a disponibilização e partilha do seu gabinete.

À Professora Doutora Cândida Vilarinho, pela disponibilidade, simpatia e pela ajuda prestada nos contactos desenvolvidos entre o Departamento de Engenharia Mecânica, o Centro de Valorização de Resíduos e a Universidade Nova de Lisboa na pessoa da Professora Doutora Margarida Gonçalves.

À Professora Doutora Margarida Gonçalves, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, pela disponibilidade e empenho, tanto na preparação das amostras de biocombustível como no transporte das mesmas. Um agradecimento também pelo seu interesse no trabalho desenvolvido.

Ao Professor Doutor Eurico Seabra, pela constante boa disposição e pelo tempo dispêndio e ajuda prestada na programação do *software LabView* do sistema de aquisição de dados.

Ao Engenheiro Hugo Rocha, da empresa Ecomovimento, pela disponibilidade, pela ajuda prestada na pesquisa de informação e pela confiança depositada na minha pessoa. A ele agradeço também todo o esforço que desenvolveu no sentido de tentar disponibilizar veículos e motores para a realização dos testes, bem como todo Biodiesel que disponibilizou.

Ao Engenheiro Pedro Lopes, da empresa My Power, pela disponibilidade para a reprogramação das centralinas, e também pelas tentativas para encontrar motores ou veículos para teste.

Aos amigos Pedro Santos e Armando Alves, que ao meu lado desenvolveram os trabalhos para as suas dissertações, antes de mais pela amizade e pelo companheirismo, mas também por toda a ajuda e apoio prestados ao longo dos trabalhos desenvolvidos, que foram determinantes para o sucesso de muitas etapas. A eles a minha gratidão também pela boa disposição, motivação e por todos os bons momentos que a sua presença proporcionou, em especial nas longas noites de trabalho, que não foram poucas, e também pelo conhecimento que conjuntamente adquirimos, o qual sem eles, não seria de tanto valor. Ainda ao Armando Alves pela preciosa ajuda e empenho na construção e desenvolvimento de toda a eletrónica do sistema de aquisição de dados.

Ao Ricardo, ao Roberto, ao Pedro, à Diana, ao Correia, ao Moniz, ao Carlos, ao Renato e todos os outros amigos, longa é a lista, que me acompanharam durante o meu percurso académico, pela amizade, motivação e por todos os bons momentos. Ainda ao Correia pela disponibilidade e pela ajuda nos primeiros ensaios.

Ao Tó Castro, pela amizade, pela motivação, pelos conselhos, pelas incontáveis pequenas grandes ajudas, e tantas vezes pelo alento.

À Marta, por toda a dedicação, pela paciência e compreensão.

Por último, mas não menos importante, aos meus pais e aos meus irmãos, André e Soraia, pela pessoa que sou, pelo importantíssimo lugar que têm na minha vida, pela inspiração, pela motivação, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo testar o funcionamento de um motor diesel, quando alimentado com biocombustível (biodiesel e/ou outros), de modo a verificar as suas características em termos de potência, consumos, e de emissões gasosas no funcionamento do motor, e do veículo.

Num estudo inicial sobre o estado da arte, após uma breve descrição do processo de produção, são analisadas as principais características dos combustíveis bem como o efeito da sua utilização no motor, designadamente no seu desempenho, nos consumos, a compatibilidade com sistemas auxiliares, e emissões poluentes. O biodiesel apresenta menor poder calorífico do que o gasóleo, pelo que ao usar-se os mesmos parâmetros de injeção usados com gasóleo, o resultado é a obtenção de menor binário e menor potência. No entanto, dado que o biodiesel tem maior índice de cetano, o motor poderá apresentar maior rendimento térmico.

Uma parte importante deste trabalho é a sua componente prática. Para a realização dos testes foi necessário proceder à adaptação do laboratório, e bastante trabalho em torno de vários motores e diferentes equipamentos. Apesar desta investigação se centrar num tipo de motor diesel, concretamente em motores de 4 cilindros, foi necessário intervir em motores a gasolina (Opel de 4 cilindros, e BMW tricilíndrico) e num motor diesel monocilíndrico (Yanmar), com o qual se efetuou o estudo, mercê das alterações ao objetivo inicial, decorrentes de restrições de vária ordem, que se verificaram no decorrer do projeto.

No que concerne ao estudo propriamente dito, são, neste documento, apresentados os resultados obtidos com gasóleo, biodiesel e misturas binárias B25, B50 e B75. Numa análise aos diversos parâmetros estudados, quando comparado com o gasóleo, o B100 apresenta menor binário e menor potência, revelando consumos específicos ligeiramente inferiores aos do gasóleo, em quase todas as velocidades de rotação. Todavia, em termos de rendimento médio o B100 apresenta um rendimento superior ao do gasóleo, sendo o B25 o combustível que apresenta melhores resultados. Quanto às emissões de escape, todos os combustíveis apresentaram valores que excedem o limite de trabalho do equipamento utilizado na medição, e portanto o limite legal, o que poderá sugerir problemas no funcionamento do motor.

Palavras-chave: biodiesel, biocombustíveis, binário, carga, emissões, poluentes, gasóleo, motor, potência, rendimento.

ABSTRACT

This work aims to test the operation of a diesel engine, when fueled with biofuels (biodiesel and/or others), in order to check their characteristics in terms of power, consumption and emissions, in the operation of the engine and of the vehicle.

A detailed State of the art study was made. It included not only a brief description of the process of biofuel production and main characteristics, but also the effect of their use in the engine, namely in its performance, consumption, compatibility with auxiliary systems, and pollutant emissions. The biodiesel has lower calorific value than the diesel fuel. When using the same parameters used with diesel fuel injection, the result is obtaining less torque and less power. However, since the biodiesel has higher cetane number, the engine normally displays a greater thermal efficiency.

The main part of this work was the experimental comparison of standard Diesel and Biodiesel fuels. To accomplish the tests it was necessary to previously adapt the lab, and a lot of work around different engines and different equipment had to be done. Despite this investigation being focused on a specific type of diesel engine, 4-cylinder engine in particular, in order to accomplish the present work it was necessary to intervene in gasoline engines (4 cylinder Opel and 3 cylinder BMW) and a single-cylinder diesel engine (Yanmar). So, it was necessary to redirect the object of the study defined in the initial goal, due to various types of external constraints, which have occurred during the project.

With regard to the study itself, in this document the results obtained with diesel, biodiesel and binary mixtures, B50 and B25 B75 is presented. Considering various parameters studied, when compared with the diesel, the B100 presents lower torque and power, revealing specific consumptions slightly lower than those of diesel, in nearly the whole rotation speed range. However, in average terms, the B100 presents a higher efficiency than diesel, with the B25 fuel showing the best results. With regard to exhaust emissions, all fuels showed a value that exceeds the limit of the equipment used in the measurement, which suggests problems in the operation of the engine.

Key-words: biodiesel, biofuel, charge, diesel, efficiency, emissions, engine, pollutants, power, torque.

ÍNDICE

Declaração	iii
Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xxii
Índice de Gráficos	xxv
Glossário de Símbolos e Abreviaturas	xxvii
1. Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Organização	4
2. Revisão Bibliográfica	7
2.1 Os Combustíveis	7
2.1.1 Gasóleo	7
2.1.2 Biodiesel	10
2.1.3 Propriedades dos Combustíveis	13
2.2 Efeito do Biodiesel no Motor Diesel	26
2.2.1 Combustão	27
2.2.2 Sistema de Injeção	32
2.2.3 Desempenho do Motor	35
2.2.4 Emissões Gasosas	40
3. Instalação Experimental	57
3.1 Preparação para Motor de 4 Cilindros	58
3.1.1 Instalação Elétrica	60
3.1.2 Alimentação de Combustível	62
3.1.3 Sistema de Escape	64
3.1.4 Sistema de Arrefecimento	64

3.1.5	Teste ao Funcionamento do Motor	65
3.1.6	Freio Dinamométrico.....	66
3.2	Preparação do motor monocilíndrico.....	69
3.2.1	Sistema de Escape	70
3.2.2	Medição de Temperaturas.....	71
3.2.3	Controlo do Acelerador.....	73
3.2.4	Anomalias de Funcionamento	75
3.3	Preparação do sistema de aquisição de dados	78
3.3.1	Leitura e Registo de Temperaturas	79
3.3.2	Pesagem de Combustível	79
3.3.3	Monitorização dos Gases de Escape	80
3.3.4	Medição de Binário e Velocidade de Rotação	81
3.3.5	Problemas Mecânicos	86
4.	Resultados Obtidos	97
4.1	Procedimento Experimental	97
4.1.1	Binário e Velocidade de Rotação.....	98
4.1.2	Gases de Escape	100
4.1.3	Consumo de Combustível	101
4.1.4	Tratamento de Dados.....	101
4.1.5	Preparação das misturas.....	102
4.2	Análise de Resultados.....	103
4.2.1	Curvas de Binário	103
4.2.2	Curvas de Potência	109
4.2.3	Consumo Específico.....	113
4.2.4	Rendimento	116
4.2.5	Temperaturas	117
4.2.6	Emissões de Gases de Escape	120
4.2.7	Diagramas de Desempenho	123
5.	Conclusões e Trabalho Futuro.....	127
5.1	Conclusões	127
5.1.1	Preparação Laboratorial	127
5.1.2	Trabalho Experimental	128
5.2	Trabalho Futuro.....	130
	Referências	135

Anexo A – Teste de Potência Realizado ao Peugeot 406 Coupé 2.2 HDI.....	143
Anexo B – Especificações Técnicas do Motor Opel C20NE [47].....	145
Anexo C – Esquema Elétrico do Motor C20NE [47]	149
Anexo D – Especificações Técnicas do Motor Yanmar L100 [49]	151
Anexo E – Equema de Montagem da Bomba Injetora do Motor Yanmar L100 [50].....	153
Anexo F – Especificações Técnicas do Freio Hidráulico Go Power Systems D-100 Series [52].	155
Anexo G – Testes Efetuados a Carga Máxima	157
Anexo H – Testes Efetuados a Cargas Parciais	163
Anexo I – Temperaturas Registadas nos Testes Efetuados a Carga Máxima.....	167
Anexo J – Emissões de Escape Registadas nos Testes Efetuados a Carga Máxima.....	173

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Aumento dos combustíveis fora da OPEP. Reproduzido de [1].	2
Figura 1.2 - Capacidade de produção e produção real de biodiesel a nível mundial. Reproduzido de [1].	3
Figura 2.1 - Esquema do processo de destilação fracionada [3].	8
Figura 2.2 – Triglicérido [4].	11
Figura 2.3 - Reação de transesterificação na produção de biodiesel. Adaptado de [7].	12
Figura 2.4 - Módulo de compresibilidade para combustíveis puros [18].	22
Figura 2.5 - Diferentes etapas da combustão nos motores de ignição por compressão [4] [27].	27
Figura 2.6 - Atraso da inflamação. Adaptado de [27].	27
Figura 2.7 - Efeito do IC no atraso de inflamação [12].	28
Figura 2.8 - Efeito da carga da motor e do teor de biodiesel no atraso de inflamação. [27]	29
Figura 2.9 - Variação da pressão dentro do cilindro a) e taxa de aumento de pressão b) com a posição da cambota. Adaptado de [30].	31
Figura 2.10 - Penetração e ângulo do spray. Adaptado de [33].	33
Figura 2.11 - Variação do DMS com a pressão de injeção [34].	34
Figura 2.12 - Distribuição de tamanhos de gotas para gasóleo e biodiesel. [34]	34
Figura 2.13 - Variação da potência produzida associada ao teor de biodiesel utilizado. [36]	36
Figura 2.14 - Consumo específico de gasóleo, biodiesel e misturas, com o motor a 25% da carga. [31]	38
Figura 2.15 - Efeito do biodiesel sobre as emissões associadas ao biodiesel. [42].	41
Figura 2.16 - Emissões de CO para o gasóleo e B100 a várias cargas (a) e para o gasóleo, B10. B50 e B100 a carga máxima (b). [31]	44
Figura 2.17 - Variação de NO _x com pressão média efectiva a 2000 rpm. [24]	46
Figura 2.18 - Emissões de NO _x para o gasóleo, B10. B50 e B100 a carga máxima (a) e para o gasóleo e B100 a várias cargas (b). [31]	47
Figura 2.19 - Emissões de HC para várias misturas de biodiesel e gasóleo a várias cargas do motor. [44]	49

Figura 2.20 - Emissões de HC para gasóleo e B100 a várias cargas do motor. [31].....	49
Figura 2.21 - Emissões de fumo do gasóleo e biodiesel a várias cargas do motor. [44]	52
Figura 2.22 - Emissões de fumo na simulação de ciclos de condução NEDC e ARTEMIS [45].	53
Figura 2.23 - Fumo produzido com a utilização de gasóleo a) e de biodiesel b) [23].....	53
Figura 3.1 - Peugeot 406 Coupé 2.2HDI.	58
Figura 3.2 - Banco de ensaios do ISEP.....	58
Figura 3.3 - Freio dinamométrico elétrico do tipo de correntes de <i>Foucault</i>	59
Figura 3.4 - Motor Opel C20NE.....	59
Figura 3.5 - Parte da instalação elétrica instalada no motor.	60
Figura 3.6 - Pormenor da bancada de controlo do motor.	61
Figura 3.7 - Mesa de apoio e controlo do motor.....	61
Figura 3.8 - Sensor de posição de cambota.....	61
Figura 3.9 - Sensor de temperatura danificado a) e novo b).....	61
Figura 3.10 - Sensor de posição da borboleta do acelerador.....	62
Figura 3.11 - Sonda Lambda.....	62
Figura 3.12 - Relé do sistema de injeção.....	62
Figura 3.13 - Unidade eletrónica de controlo do motor.	62
Figura 3.14 - bomba de combustível e respectivo elemento filtrante.....	63
Figura 3.15 - bomba de combustível desmontada para limpeza.....	63
Figura 3.16 - Sistema de torneiras para encaminhamento de combustível.	63
Figura 3.17 - Sistema de escape. Secção original (a) e ligação à panela central e silenciador (b)..	64
Figura 3.18 - Radiadores instalados horizontalmente.....	65
Figura 3.19 - Reservatório de água dos radiadores.	65
Figura 3.20 - Transmissão mecânica ao freio dinamométrico.	67
Figura 3.21 - Localização da célula de carga.....	67
Figura 3.22 - Posicionamento da célula de carga na estrutura do dinamómetro.	67

Figura 3.23 - Pormenor da base de fixação da barra de calibração.	68
Figura 3.24 - Localiação da barra de calibração.....	68
Figura 3.25 - Sensor de rotações indutivo.....	68
Figura 3.26 - Sensor de rotações ótico.	68
Figura 3.27 - Motor Yanmar L100 V [49].	69
Figura 3.28 - Parte do tubo de escape instalado inicialmente.....	70
Figura 3.29 - Novo tubo de escape instalado e isolado termicamente.....	70
Figura 3.30 - Material usado na adaptação da união flexível.....	71
Figura 3.31 - União flexível soldada e isolada.....	71
Figura 3.32 - Tubo de recolha de gases para análise.	71
Figura 3.33 - Termopar do tipo "K" de bainha metálica com bicone de vedação.	71
Figura 3.34 - Medição da temperatura dos gases de escape.....	72
Figura 3.35 - Medição da temperatura da culassa.	72
Figura 3.36 - Termopar para medição de temperatura do ar da admissão.....	72
Figura 3.37 - Integração do termopar na tampa de verificação do nível de óleo.	73
Figura 3.38 - Aspeto do termopar colocado no motor.....	73
Figura 3.39 - Cabo de controlo da válvula do acelerador.	73
Figura 3.40 - Manivela de controlo da posição do acelerador.	73
Figura 3.41 - Posições pré-definidas na válvula do acelerador.	75
Figura 3.42 - Posições pré-definidas na manivela de controlo.....	75
Figura 3.43 - Injetor e linha de alta pressão do motor Yanmar L100.	76
Figura 3.44 - Residuo carbonoso no bico do injetor (assinalado).	76
Figura 3.45 - Encaixe do injetor.....	76
Figura 3.46 - Localização da bomba de combustível.	77
Figura 3.47 - Bomba de combustível.	77
Figura 3.48 - Alguns componentes retirados da bomba de combustível.....	77

Figura 3.49 - Conjunto de computadores usados na aquisição de dados.....	78
Figura 3.50 - Placa terminal <i>National Instruments TBX-68T</i>	79
Figura 3.51 - Placa de aquisição <i>National Instruments NI4350</i>	79
Figura 3.52 - Balança de precisão <i>KERN FCB-12K0.1B</i>	80
Figura 3.53 - Sistema de pesagem de combustível.....	80
Figura 3.54 - Analisador de gases <i>TESCO 350XL</i>	81
Figura 3.55 - Sonda de recolha de gases.....	81
Figura 3.56 - Freio hidráulico D100 Series da Go Power Systems.....	81
Figura 3.57 - Placa de aquisição NI USB-6008.....	82
Figura 3.58 - Placa amplificadora INA 125.....	82
Figura 3.59 - Protótipo do sistema de aquisição de dados.....	85
Figura 3.60 - Acondicionamento das placas de aquisição (A), de transmissão (B), e amplificador de instrumentação (C).....	85
Figura 3.61 - Caixa de acondicionamento do sistema de aquisição de dados.....	85
Figura 3.62 - Sistema de suporte do freio hidráulico.....	87
Figura 3.63 - Posicionamento do freio hidráulico no novo suporte.....	87
Figura 3.64 - Veio de transmissão.....	87
Figura 3.65 - Motor BMW K75 na sua estrutura de suporte.....	88
Figura 3.66 - Óleo vazado pelo motor.....	89
Figura 3.67 - Desacoplamento do suporte do freio.....	89
Figura 3.68 - Freio hidráulico desmontado.....	90
Figura 3.69 - Parafusos substituídos (assinalados).....	90
Figura 3.70 - Localização de um dos pinos de pivotagem (A) e casquilho (B).....	91
Figura 3.71 - Maquinagem de um casquilho.....	91
Figura 3.72 - Casquilho maquinado em <i>teflon</i> (A) e casquilho original (B).....	91
Figura 3.73 - Casquilho original (assinalado) e casquilhos maquinados em nylon grafitado.....	92
Figura 3.74 - Substituição de um dos casquilhos.....	92

Figura 3.75 - Rótula partida devido a vibrações.....	92
Figura 3.76 - Tentativa de reparação por soldagem.	92
Figura 3.77 - Parafusos danificados por vibrações.	93
Figura 3.78 - Parafusos de fixação da célula de carga danificados (Assinalados).	93
Figura 3.79 - Recuperação da ponta de um parafuso partido.	93
Figura 3.80 - Deslocação de um dos pinos de pivotagem.....	93
Figura 3.81 - Barramento de um dos pinos.	93
Figura 4.1 - Depósito para amostra do bio-óleo.....	98
Figura 4.2 - Menu de apresentação do <i>software Power Logger</i>	99
Figura 4.3 - Válvulas de controlo do freio hidráulico. Válvula de controlo fino (A) e de controlo normal (B).	100
Figura 4.4 - Goblé utilizado na preparação das amostras.	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Combustíveis obtidos pela refinação do petróleo e suas percentagens mássicas. Adaptado de [3].	9
Tabela 2.2 - Produção por hectare das principais matérias primas do biodiesel [2].	10
Tabela 2.3 – Massa volúmica de alguns combustíveis [10] [11].	14
Tabela 2.4 - Viscosidade cinemática de alguns combustíveis [10] [11].	15
Tabela 2.5 - Índice de Cetano de alguns combustíveis. [10] [11]	16
Tabela 2.6 - Poder calorífico de alguns combustíveis puros (Método UNE51123). Adaptado de [13]	17
Tabela 2.7 - Efeito lubrificante do biodiesel enquanto aditivo do gasóleo ULSD. Valores em μm (WS1,4). Adaptado de [10].	18
Tabela 2.8 - Ponto de inflamação de alguns combustíveis [10] [15] [16].	19
Tabela 2.9 - Propriedades de fluxo a frio de alguns combustíveis [9] [10].	21
Tabela 2.10 - Compatibilidade de diferentes materiais com o biodiesel. Adaptado de [2].	24
Tabela 2.11 - Comparação das propriedades do biodiesel e do gasóleo. Adaptado de [8].	26
Tabela 2.12 - Principais poluentes emitidos pelos veículos com motor diesel. Reproduzido de [40]	40
Tabela 2.13 - Limites de emissões poluentes para veículos com motor diesel. [43].	42
Tabela 2.14 - Tipos de motor utilizados nos casos de estudo apresentados para a análise de emissões poluentes.	42
Tabela 2.15 - Impacto das diferentes cargas do motor nas emissões de CO. Adaptado de [44]	44
Tabela 2.16 - Redução nas emissões de fumo a diferentes cargas do motor. [44].	52
Tabela 3.1 - Especificações técnicas do motor Opel C20NE. Adaptado de [47].	59
Tabela 3.2 - Características das bombas de combustível utilizadas.	64
Tabela 3.3 - Especificações técnicas do motor Yanmar L100 V. Adaptado de [49].	69
Tabela 3.4 - Escalonamento das várias posições do acelerador.	74
Tabela 3.5 - Principais componentes do sistema de aquisição de dados.	84
Tabela 3.6 - Características técnicas do motor BMW K75	88

Tabela 4.1 - Misturas binárias de combustíveis.....	102
Tabela 4.2 - Poderes caloríficos e rendimentos obtidos para cada combustível.....	116
Tabela 4.3 - Temperaturas médias registadas durante a realização dos testes.	118
Tabela 5.1 - Potência e binário máximos para os diversos combustíveis testados.	129
Tabela 5.2 - Consumo específico e rendimento médios obtidos.	129

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Valores de binário obtidos com o sistema de aquisição de dados inicial.	82
Gráfico 3.2 - Curva de binário original do motor Yanmar L100.	82
Gráfico 3.3 - Comparação do binário obtido por leitura com multímetro.	83
Gráfico 4.1 - Comparação das curvas de binário obtidas com a curva original do motor.	104
Gráfico 4.2 - Curvas de binário obtidas com gasóleo e B25.....	105
Gráfico 4.3 - Curvas de binário obtidas com gasóleo e B50.....	105
Gráfico 4.4 - Curvas de binário obtidas com gasóleo e B75.....	106
Gráfico 4.5 - Curvas de binário obtidas com gasóleo e B100.....	106
Gráfico 4.6 - Curvas de binário para várias cargas parciais, obtidas com gasóleo.	107
Gráfico 4.7- Curvas de binário para várias cargas parciais, obtidas com B100.	107
Gráfico 4.8 - Comparação do binário obtido com Gasóleo e B100 a carga máxima.	108
Gráfico 4.9 - Comparação do binário obtido com Gasóleo e B100 a 3/4 da carga.....	108
Gráfico 4.10 - Comparação do binário obtido com Gasóleo e B100 a 1/2 da carga.....	108
Gráfico 4.11 - Comparação do binário obtido com Gasóleo e B100 a 1/4 de carga.....	108
Gráfico 4.12 - Comparação das curvas de potência obtidas com a curva original do motor.....	110
Gráfico 4.13 - Curvas de potência obtidas com gasóleo e B25	110
Gráfico 4.14 - Curvas de potência obtidas com gasóleo e B50	110
Gráfico 4.15 - Curvas de potência obtidas com gasóleo e B75.	111
Gráfico 4.16 - Curvas de potência obtidas com gasóleo e B100.	111
Gráfico 4.17 - Curvas de potência para várias cargas parciais, obtidas com gasóleo.....	111
Gráfico 4.18 - Curvas de potência para várias cargas parciais, obtidas com B100.....	112
Gráfico 4.19 - Comparação da potência obtida com Gasóleo e B100 a carga máxima.	113
Gráfico 4.20 - Comparação da potência obtida com Gasóleo e B100 a 3/4 da carga.	113
Gráfico 4.21 - Comparação da potência obtida com Gasóleo e B100 a 1/2 da carga.	113
Gráfico 4.22 - Comparação da potência obtida com Gasóleo e B100 a 1/4 da carga.	113

Gráfico 4.23 - Curvas de consumo específico dos vários combustíveis testados.	115
Gráfico 4.24 - Consumo específico obtido com B25.	115
Gráfico 4.25 - Consumo específico obtido com B50.	115
Gráfico 4.26 - Consumo específico obtido com B75.	115
Gráfico 4.27 - Consumo específico obtido com B100.	115
Gráfico 4.28 - Rendimentos do motor obtidos com os vários combustíveis testados.	117
Gráfico 4.29 – Curvas de temperatura dos gases de escape.....	118
Gráfico 4.30 – Curvas de temperatura do óleo do motor.	119
Gráfico 4.31 – Curvas de temperatura no exterior da culassa.	120
Gráfico 4.32 - Emissões de escape produzidas pelo Gasóleo.	121
Gráfico 4.33 - Emissões de escape produzidas pelo B25.	121
Gráfico 4.34 - Emissões de escape produzidas pelo B50.	122
Gráfico 4.35 - Emissões de escape produzidas pelo B75.	122
Gráfico 4.36 - Emissões de escape produzidas pelo B100.	123

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Símbolos Romanos	Definição	Unidade
B100	Biodiesel puro	
B%	Percentagem de biodiesel na mistura	% (vol)
B	Binário	N.m
bhp	<i>Brake horse power</i>	
C_s	Consumo específico	g/kWh
CO	Monóxido de carbono	
CO ₂	Dióxido de carbono	
ha	Hectare	
HC	Hidrocarbonetos	
k	Compressibilidade	m ² /N
K	Kelvin	
\dot{m}_f	Caudal	g/s
N	Velocidade de rotação	rpm
N	Newton	
NO _x	Óxido de azoto	
°CA	Grau de cambota (<i>degree crank angle</i>)	
p	Pressão	Pa
ppm	Partes por milhão	
Q_f	Poder calorífico inferior	J/g
Q_{pi}	Poder calorífico (inferior a pressão constante)	J/g
rpm	Rotações por minuto	
SO _x	Óxido de enxofre	
v	Volume	m ³
v/v	Fração volúmica (<i>volume fraction</i>) – percentagem em volume	
\dot{W}	Potência	kW
\dot{W}_e	Potência efetiva	kW
w/w	Fração mássica (<i>mass fraction</i>) – percentagem em massa	

Símbolos Gregos	Definição	Unidade
ν	Viscosidade cinemática	mm ² /s
ρ	Massa volúmica	kg/m ³
Ω	Velocidade de rotação	rad/s
η	Rendimento	%

Abreviaturas

BHA	Hidroxianisol butilado (<i>butylated hydroxyanisole</i>)
BHT	Hidroxitolueno butilado (<i>butylated hydroxytoluene</i>)
BMEP	Pressão média efetiva (<i>break mean effective pressure</i>)
CE	Consumo específico
CFPP	Ponto de entupimento de filtro (<i>cold filter plugging point</i>)
CI	Ignição por compressão (<i>compression ignition</i>)
CP	Ponto de nuvem (<i>cloud point</i>)
CR	Curva de rendimento
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DMS	Diâmetro Médio de <i>Sauter</i>
EGR	Recirculação de gases de escape (<i>exhaust gas recirculation</i>)
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
EPDM	Monómero de etileno-propileno-dieno (<i>ethylene propylene diene monomer</i>)
FAME	Éster metílico de ácidos gordos (<i>fatty acid methyl ester</i>)
FSN	<i>Filter Smoke Number</i>
HVO	Óleo vegetal tratado com hidrogénio (<i>hydrotreated vegetable oil</i>)
IC	Índice de cetano
JME	Éster metílico de óleo de <i>Jatropha</i> (<i>Jatropha oil methyl ester</i>)
LTFT	Teste de fluidez a baixa temperatura (<i>Low-Temperature Flow Test</i>)
NEDC	Novo Ciclo de Condução Europeu (<i>New European Driving Cycle</i>)
OPEP	Organização de Países Exportadores de Petróleo
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PM	Partículas (<i>particulate matter</i>)
PME	Éster metílico de óleo de palma (<i>Palm oil methyl ester</i>)

PP	Ponto de fluidez (<i>pour point</i>)
RME	<i>Rapeseed oil methyl ester</i>
SFME	Éster metílico de óleo de girassol (<i>Sunflower oil methyl ester</i>)
SME	<i>Soybean oil methyl ester</i>
TBHQ	Butil-hidroquinona terciária (<i>tert-butylhydroquinone</i>)
UDC	Ciclo de condução urbano (<i>urban driving cycle</i>)
ULSD	Gasóleo com baixo teor de enxofre (<i>ultra low sulfur diesel</i>)
VOC	Compostos orgânicos voláteis (<i>volatile organic compounds</i>)
WCOEE	Éster etílico de óleos de cozinha usados (<i>Waste cooking oil ethyl ester</i>)
WCOME	Éster metílico de óleos de cozinha usados (<i>Waste cooking oil methyl ester</i>)

1 INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

“O motor a diesel pode ser alimentado por óleos vegetais, o que vai ajudar ao desenvolvimento agrário dos países que vierem a utilizá-lo. O uso de óleos vegetais como combustível pode parecer insignificante hoje em dia. Mas com o tempo irão tornar-se tão importantes quanto o petróleo e o carvão são atualmente.” (Rudolf Diesel)

Esta era, à época, a visão de Rudolf Christian Karl Diesel (1853-1913), o inventor do primeiro motor diesel que funcionou de forma eficiente em 1893. Este motor foi criado na Alemanha, mais concretamente em Augsburg, por Rudolf Diesel de quem recebeu o nome, e utilizava como combustível o óleo de amendoim. O motor diesel foi oficialmente apresentado em 1898 na Feira Mundial de Paris, em França. Após a morte de Diesel, o motor por si desenvolvido foi capitalizado pela indústria petrolífera que criou um óleo mais barato do que os outros combustíveis, ficando conhecido por “óleo diesel” que, com o tempo, fez esquecer os óleos vegetais como fonte de combustível [1] [2].

Rudolf Diesel estaria porventura à frente do seu tempo, pois esta sua visão futurista vem ganhando, nos dias de hoje, cada vez mais importância, particularmente em regiões como a Europa. A escassez dos combustíveis de origem fóssil, a escalada dos seus preços, a necessidade de reduzir as emissões de poluentes e de gases com efeito de estufa, são fatores que obrigam o homem a encontrar alternativas ecologicamente mais limpas e sustentáveis [2].

Desde há muito que as questões ambientais relacionadas com o efeito de estufa têm levado ao desenvolvimento de esforços no sentido de se reduzir as emissões, não só de CO₂ (dióxido de carbono), como de outros poluentes, o que conduziu à adoção de diversas medidas contempladas no protocolo de Kyoto. Contudo medidas de adoção lenta, às quais foi atribuído um novo sentido de urgência pela evolução dos preços do petróleo nos últimos anos em parte decorrente do enorme aumento do consumo por parte de economias emergentes como as da Índia e da China. Factos que despertaram a atenção da comunidade internacional para a enorme dependência de energia de origem fóssil.

Graças à produção crescente de biocombustíveis, o já referido aumento do preço do petróleo não se tem verificado de forma tão brusca. Os gráficos da Figura 1.1 traduzem bem a influência dos biocombustíveis nesse aumento, podendo observar-se também os aumentos dos combustíveis fora da OPEP.

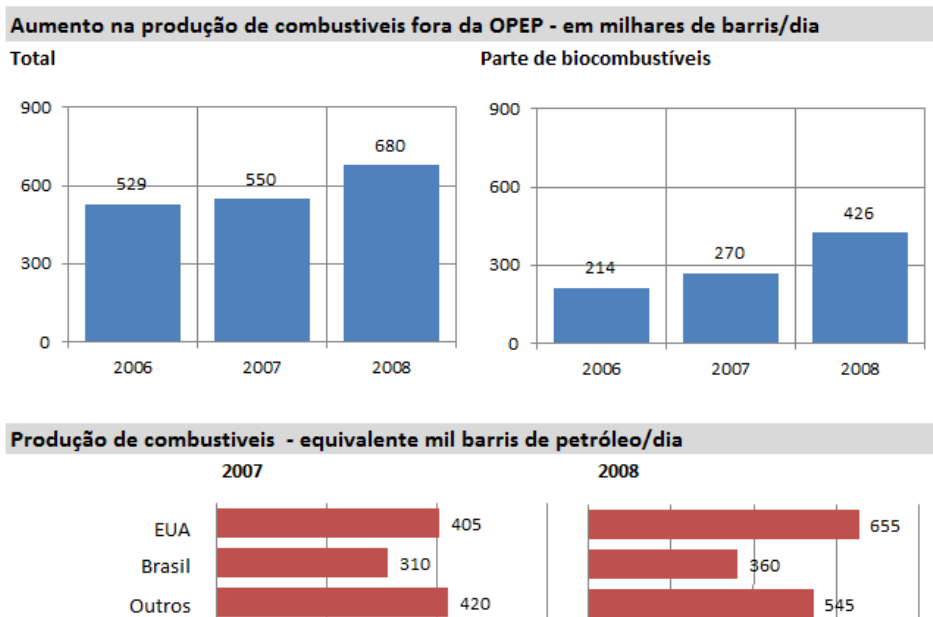


Figura 1.1 - Aumento dos combustíveis fora da OPEP. Reproduzido de [1].

Como consequência destes acontecimentos, em Portugal e na Europa, estão atualmente em vigor uma série de medidas que visam a promoção do uso de energias alternativas. A isenção dos biocombustíveis de imposto sobre os produtos petrolíferos e energéticos, a recomendação da mistura de uma determinada percentagem de biocombustível no combustível normal, são algumas dessas medidas. No caso concreto de Portugal, previa-se que em 2010, por força da aplicação destas medidas, o consumo de biodiesel fosse no mínimo de 350 mil toneladas podendo este valor ser ainda aumentado pelo facto do preço deste biocombustível se tornar inferior ao do gasóleo.

De facto tem-se verificado nos últimos anos que o aumento da produção de biodiesel tem sido exponencial, o qual vem sido acompanhado por um crescimento na capacidade produtiva deste biocombustível, sendo que neste último caso o aumento é ainda maior, conforme demonstra o gráfico da Figura 1.2. Entre os grandes produtores Europeus encontram-se atualmente a Alemanha, a França e a Itália. Contudo, Portugal e Espanha, entre outros países, começam agora a apresentar uma produção significativa [1].

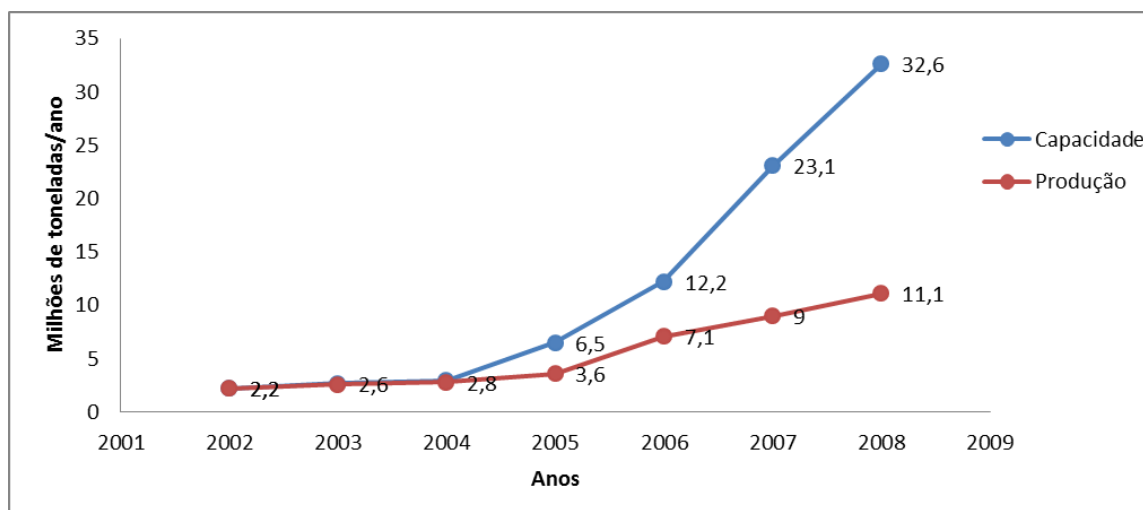


Figura 1.2 - Capacidade de produção e produção real de biodiesel a nível mundial. Reproduzido de [1].

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo testar o funcionamento de um motor diesel, quando alimentado com biocombustível (biodiesel e/ou outros), de modo a verificar as suas características em termos de potência, consumos e de emissões gasosas no funcionamento do motor e do veículo.

Após um estudo inicial sobre o estado da arte, pretende-se estudar o comportamento de um motor de ciclo diesel funcionando a gasóleo e mudando para biodiesel ou outros biocombustíveis. O biodiesel apresenta menor poder calorífico, pelo que ao usar-se os mesmos parâmetros de injeção usados com gasóleo, o resultado deverá ser a obtenção de menor binário e menor potência. No entanto, dado que o biodiesel tem maior índice de cetano (IC), o motor poderá apresentar maior rendimento térmico.

Um dos interesses deste trabalho consiste em estudar os parâmetros que permitem que um motor, funcionando a biodiesel, tenha prestações semelhantes (binário e potência) às que teria quando alimentado com gasóleo. Por outro lado, dado que o biodiesel tem maior IC e a sua queima é mais limpa (produz menos fumos por ter oxigénio na sua constituição), o objetivo é tentar aumentar as prestações do motor usando o mesmo limite de fumo que está estabelecido para motor original a gasóleo, residindo neste ponto o carácter inovador deste projeto.

Posteriormente pretende-se estudar o comportamento do motor diesel mas alimentado com novos biocombustíveis desenvolvidos recentemente, provavelmente em misturas binárias de modo

a que permitam um correto funcionamento do motor, comparando os novos valores obtidos com os de referência.

1.2 ORGANIZAÇÃO

O presente documento encontra-se organizado em quatro partes principais além da parte introdutória. Após um breve enquadramento do tema presente no capítulo inicial, é efetuada no capítulo dois uma revisão bibliográfica acerca do tema, onde se apresentam diversos conceitos e características relacionadas com os combustíveis necessários a uma melhor compreensão dos vários estudos já realizados, que também aqui se documentam.

O terceiro capítulo deste trabalho é inteiramente dedicado ao trabalho prático desenvolvido, onde são descritas todas as atividades que se realizaram em torno da adaptação do laboratório, bem como preparação e reparação de motores e equipamentos.

No capítulo quarto, previamente à apresentação dos resultados, é descrito o procedimento utilizado na sua determinação. São, também neste capítulo, apresentados os resultados os quais são maioritariamente ilustrados por gráficos, encontrando-se nos anexos assinalados as tabelas com os valores que lhes dão origem.

Por último, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões deste trabalho sendo ainda apresentadas algumas sugestões relativas a possíveis trabalhos a desenvolver no futuro.

Finalmente são ainda apresentados vários anexos dos quais consta diversa informação complementar relativa aos trabalhos desenvolvidos e equipamentos utilizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de se abordarem os objetivos deste trabalho é necessário compreender um pouco os combustíveis, ou seja saber as suas origens, as suas propriedades, bem como os efeitos que a variação nos valores destas têm no funcionamento do motor e seus sistemas auxiliares. Este capítulo versa sobre isso mesmo. Nas páginas seguintes serão explicadas as origens, os processos de produção, e propriedades dos combustíveis objetos de estudo neste trabalho (o gasóleo e o biodiesel). O efeito destes combustíveis e das suas propriedades nos motores são também objeto de análise.

Na origem da informação a seguir documentada está uma pesquisa bibliográfica que se focou essencialmente nas mais recentes publicações científicas sobre o assunto, procurando assim refletir o atual estado da arte sobre o tema.

2.1 Os COMBUSTÍVEIS

Este subcapítulo é essencialmente dedicado aos dois tipos de combustível mais usado no motor de ignição por compressão, o gasóleo e o biodiesel. Embora ambos tenham origem biológica, a grande diferença entre eles é a escala de tempo. Enquanto o gasóleo, combustível de origem fóssil, tem na sua génese em plantas e animais que viveram há centenas de milhões de anos, os biocombustíveis resultam de matéria que se encontrava viva há poucos anos, ou mesmo dias [3]. Após uma breve abordagem aos processos de produção destes combustíveis é também feita uma apresentação das suas principais propriedades, dada a sua importância e influência no funcionamento do motor diesel, tema que se abordará nos capítulos seguintes.

2.1.1 Gasóleo

A maior parte dos combustíveis utilizados têm a sua origem no petróleo bruto ou *crude oil*, como também é designado [4]. Trata-se de uma fonte de energia de origem fóssil, não renovável, sendo a principal matéria-prima da indústria petrolífera.

O petróleo bruto é constituído por mistura complexa de hidrocarbonetos líquidos e quantidades menores de compostos de enxofre, oxigénio, azoto, metais pesados e outros minerais, resultando, da sua refinação, diversos combustíveis de uso corrente entre os quais o gasóleo. O crude é geralmente

tratado em refinarias, onde é sujeito a destilação fracionada, processos de *cracking* (térmico e catalítico), reformação e remoção de impurezas. Um esquema deste processo é ilustrado na Figura 2.1.

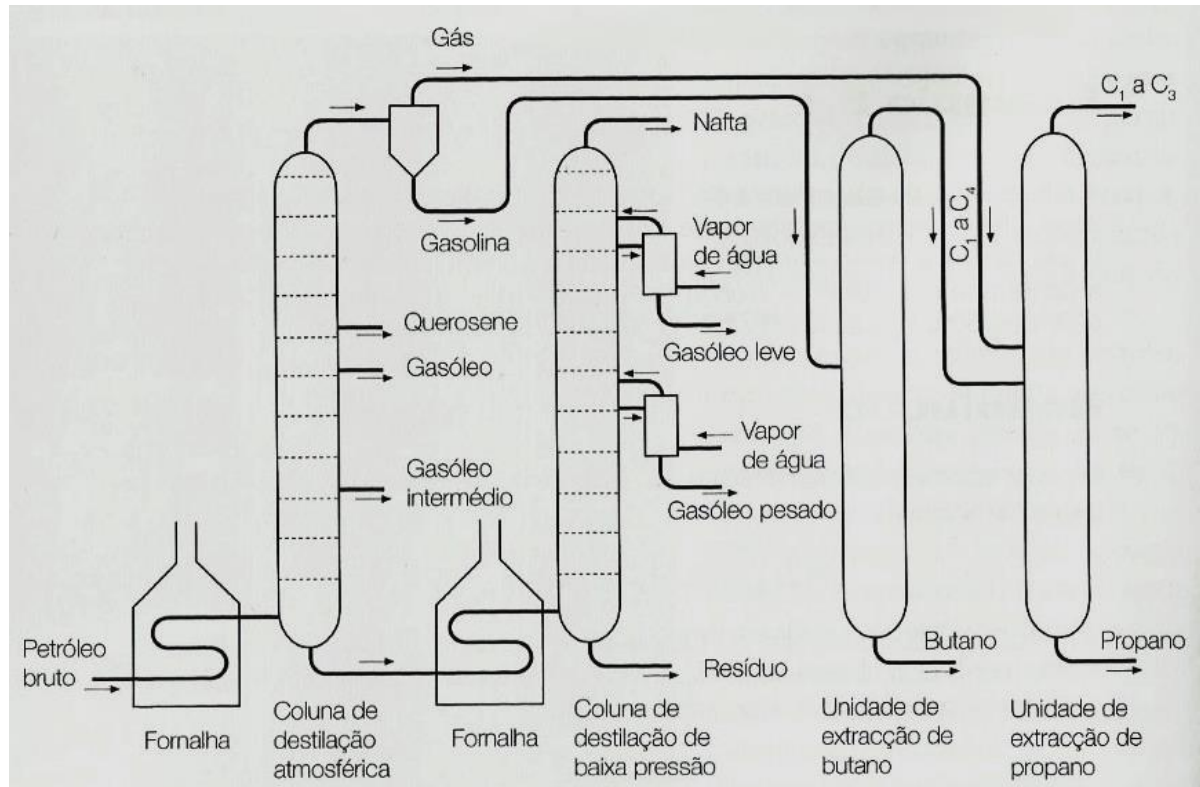


Figura 2.1 - Esquema do processo de destilação fracionada [3].

Inicialmente o petróleo é pré-aquecido antes de ser introduzido numa coluna de destilação atmosférica onde as diversas frações são separadas, aproveitando a diferença de volatilidade entre elas, sendo normalmente, de seguida, efetuada uma outra a baixa pressão de modo a refinar a separação. Posteriormente as frações sofrem processos de purificação onde é retirado o enxofre e alguns hidrocarbonetos perigosos, sendo os resíduos sujeitos a uma nova destilação a baixa pressão para remoção do alcatrão. O material resultante é submetido a processos de *cracking* catalítico, do qual resultam o gasóleo pesado entre outros produtos leves. Uma combinação de alcatrão e gasóleo pesado sofre ainda um processo de *cracking* térmico do qual resultam mais produtos leves, tais como gasolina, gasóleo e fuelóleo, entre outros. Após estes processos seguem-se ainda outros como a reformação e hidrogenação, que permitem o controlo do índice octano e o teor em hidrogénio de um dado combustível. A Tabela 2.1 enumera os combustíveis que tipicamente são obtidos pela refinação do petróleo [3].

Tabela 2.1 - Combustíveis obtidos pela refinação do petróleo e suas percentagens mássicas. Adaptado de [3]

Combustível	Percentagem mássica
GPL	3,7
Gases de refinaria	2,9
Nafta	1,3
Gasolina	38,9
Gás de ar	0,2
Combustíveis para aviação	5,6
Querosene	0,8
Gasóleo	18,2
Óleo lubrificante	18,2
Fuel-óleos residuais	16,6
Outros	11,8

O gasóleo é também designado por óleo diesel, conforme explicado anteriormente é um dos derivados da destilação do petróleo. Trata-se de um composto constituído por hidrocarbonetos com moléculas formadas por 9 a 27 átomos de carbono, pequenas quantidades de enxofre, azoto, oxigénio e compostos metálicos. Os hidrocarbonetos presentes no gasóleo incluem alcanos, naftalenos, olefinas e aromáticos. Uma das propriedades dos hidrocarbonetos é a sua temperatura de autoignição que aumenta com a volatilidade dos hidrocarbonetos. Além destes compostos são adicionadas outras substâncias de modo a melhorar as características do combustível. Um gasóleo de boa qualidade é caracterizado por um baixo teor de enxofre e aromáticos, boas características de ignição, propriedades adequadas à utilização em climas frios, baixo conteúdo de substâncias poluentes, bem como valores adequados de densidade, viscosidade e ponto de ebulição. Este último pode variar entre 172 e 367°C [5].

Outras propriedades, tais como o poder calorífico, volatilidade, tendência a formação de depósitos, limpeza e corrosibilidade, são também de grande importância visto que antes de ser queimado na câmara de combustão o combustível tem de percorrer todo o sistema de alimentação do veículo. Isto tem especial relevância do ponto de vista dos fabricantes de motores diesel porque além do desempenho do motor e do sistema de alimentação, o conhecimento destas propriedades é também necessário para se poder garantir a segurança dos utilizadores e a longevidade dos equipamentos [6].

2.1.2 Biodiesel

O biodiesel é um combustível alternativo de origem renovável, obtido a partir de óleos crus ou usados de origem vegetal ou animal, podendo substituir na totalidade ou em parte o gasóleo produzido a partir de combustíveis fósseis não renováveis. Este biocombustível resulta da produção agrícola, fechando assim o ciclo de carbono. É portanto menos poluente que o gasóleo de origem fóssil, contribuindo para uma diminuição dos gases com efeito de estufa [2].

Os óleos usados na produção dos biodiesel podem ser obtidos a partir de uma grande variedade de matérias-primas. As mais comuns são os óleos vegetais tais como óleo de soja, palma, amendoim, colza/canola, girassol, sésamo, coco, semente de algodão, Jojoba, entre outros. As microalgas começam também a ser fonte de obtenção de óleos para produção de biodiesel, podendo a sua produtividade por hectare vir a ser cerca de 100 vezes maior às plantas superiores. A Tabela 2.2 apresenta os valores de produção por hectare das principais matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel, embora algumas opções apresentadas, tais como a palma e as microalgas, devessem ser objeto de estudo, mercê da sua produtividade a diferentes latitudes [2] [7].

Tabela 2.2 - Produção por hectare das principais matérias primas do biodiesel [2].

Cultura	kg_{óleo}/ha/ano
Linho	402
Soja	420
Arroz	696
Girassol	800
Cacau	863
Amendoim	890
Papoila de ópio	978
Colza	1000
Azeitonas	1019
Nozes pecan	1505
Jojoba	1528
Jatropha	1590
Macadamia	1887
Abacate	2217
Coco	2260
Óleo de palma	5000
Microalgas	47000 a 94000

O óleo de frituras, provenientes da indústria alimentar, bem como gorduras de origem animal, tais como as gorduras de bovino, porco, frango ou mesmo de peixes, são também uma fonte de obtenção de óleos para produção de biodiesel [2] [7].

O biodiesel resulta dos processos de esterificação dos óleos e posterior transesterificação dos ésteres [2]. Quimicamente os óleos vegetais e gorduras animais são compostos por moléculas de triglicéridos nas quais três grupos de ácidos gordos (ésteres) estão ligados a uma molécula de glicerol (Figura 2.2), já o biodiesel é definido como sendo composto por ésteres monoalquílicos (etílicos ou metílicos) de ácidos gordos de cadeia longa derivados de fontes lipídicas renováveis [8], pelo que é também conhecido por FAME (sigla inglesa que designa o éster metílico de ácidos gordos) que é também a denominação genérica utilizada para designar os óleos de origem vegetal ou animal depois de transesterificados [4].

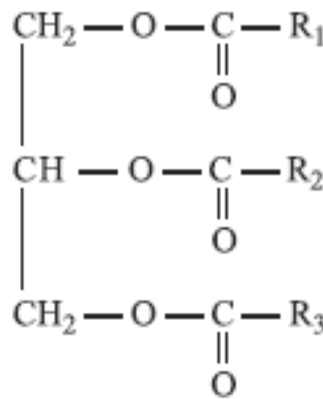


Figura 2.2 – Triglicérido [4].

Produção de biodiesel

A possibilidade de usar os óleos vegetais como combustível tem sido reconhecida desde a invenção dos motores diesel. Um dos problemas dos óleos vegetais é a sua alta viscosidade para utilização na maioria dos atuais motores diesel como substituto direto do gasóleo. Existem vários métodos para reduzir a viscosidade destes óleos, uma das mais comuns é a transesterificação, também designada por alcoólise de ésteres carboxílicos [8].

A reação de transesterificação é, de longe, o mais importante processo utilizado na produção de biodiesel, consistindo na reação das moléculas de triglicéridos com um álcool (metanol ou etanol) da qual resultam os correspondentes ésteres metílicos ou etílicos [9]. É um processo em que ao óleo é

adicionado uma certa quantidade de álcool, utilizando-se normalmente metanol, resultando desta reação biodiesel e glicerina. Esta reação é representada na Figura 2.3.

De um modo geral, a quantidade de álcool adicionada ronda os 10%, sendo também aproximadamente esta a quantidade de glicerina resultante do processo. Para que o rendimento desta reação seja elevado é necessário que se eleve a temperatura o mais possível, sendo porém limitada pela temperatura de ebulição do metanol que é de 65°C, e que ocorra na presença de um catalisador, além da percentagem de álcool fornecido ter que ser significativamente superior à teórica requerida (até 150%).

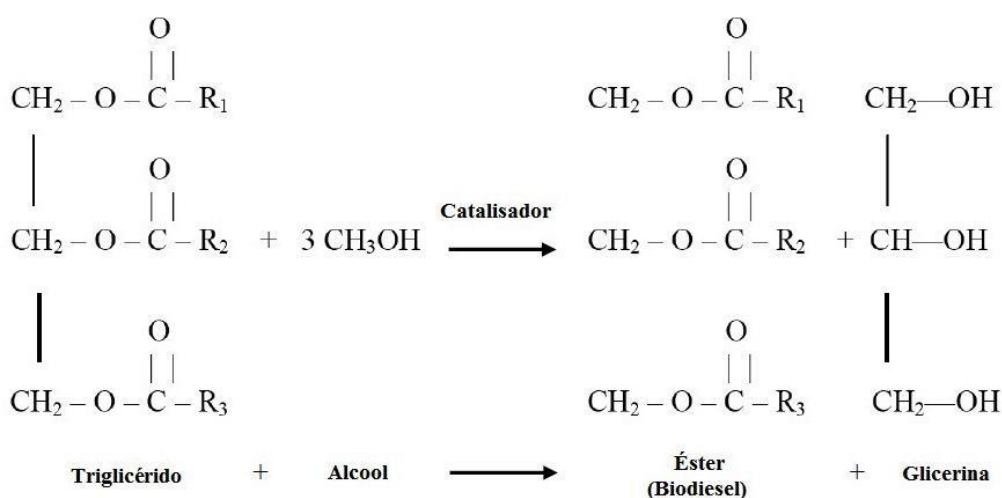


Figura 2.3 - Reação de transesterificação na produção de biodiesel. Adaptado de [7].

Os catalisadores usados na aceleração da reação podem ser ácidos ou alcalinos, sendo normalmente utilizados os hidróxidos de potássio e de cálcio (soda cáustica). Estes catalisadores são bastante ativos e têm a vantagem do seu custo ser baixo. A possibilidade de produzirem sabões é uma desvantagem, o que se torna prejudicial no processo. Como a produção de sabões ocorre na presença de água, interessa que o álcool seja anidro, ou seja, que a quantidade de água presente seja inferior a 0,06%. Estes catalisadores são retirados no final do processo por lavagem com água acidulada, água esta que também ajudará na separação da glicerina do biodiesel. No final do processo, tanto a água como o álcool são retirados elevando-se o biodiesel acima do ponto de ebulição de ambos os líquidos, geralmente a 105°C. O biodiesel resultante deste processo não poderá apresentar um teor de água superior a 0,05%, de modo a satisfazer as normas. Como atrás foi referido, interessa que a quantidade de metanol fornecido seja superior à teoricamente necessária, pelo que ficará algum álcool no biodiesel. Este deve ser retirado aquando do aumento da temperatura acima do seu ponto de ebulição, sendo recuperado por condensação.

2.1.3 Propriedades dos Combustíveis

Conforme já referido anteriormente, as diferentes propriedades dos combustíveis têm um importante efeito no funcionamento e desempenho do motor. Apresentam-se de seguida as mais importantes, os seus valores típicos para cada combustível, os parâmetros por elas afetados entre outras particularidades.

2.1.3.1 Massa Volúmica

A massa volúmica de um combustível representa o valor da sua quantidade de massa por unidade de volume, medida em vácuo. Este parâmetro é fortemente influenciado pela temperatura, pelo que os padrões de teste determinam a sua medição a 15° C. Esta propriedade do combustível afeta diretamente o seu desempenho, bem como algumas das suas propriedades tais como o índice de cetano, o poder calorífico e viscosidade [10].

A combustão e qualidade de atomização são também afetadas pela massa volúmica do combustível. Como no sistema dos motores diesel o combustível é doseado volumetricamente, a variação deste parâmetro afeta a massa de combustível que chega à câmara de combustão e, consequentemente, o conteúdo de energia, uma vez que a relação ar/combustível é alterada tendo repercussões na potência do motor [10].

A massa volúmica do biodiesel é tipicamente maior do que a do gasóleo, sendo dependente do seu grau de pureza, do teor de ácidos gordos, do conteúdo de água e da temperatura. Como o biodiesel é constituído por ésteres etílicos ou metílicos, sendo a densidade destes muito semelhantes, a sua massa volúmica varia entre limites apertados. Sendo que a contaminação de biodiesel afeta significativamente esta propriedade, ela torna-se assim num bom indicador de contaminação [10].

Valores típicos da massa volúmica do gasóleo e de alguns ésteres são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Massa volúmica de alguns combustíveis [10] [11].

Combustível	Massa volúmica (ρ), kg/m³
JME	870 – 880,3
PME	864,4 – 870
RME	880,2
SFME	878 – 884
SME	872 – 885
WCOEE	888,5
WCOME	920
Gasóleo (ULSD)	835

2.1.3.2 Viscosidade

A viscosidade é a propriedade física que caracteriza a resistência que um fluido oferece ao deslizamento das suas moléculas entre si, sob ação de tensões de corte [12].

Esta é uma das propriedades mais importantes do biodiesel visto que tem grande influência no funcionamento do sistema de injeção, especialmente em baixas temperaturas, as quais afetam a fluidez do combustível. Um valor alto de viscosidade leva a operação menos precisa dos injetores, prejudicando a atomização do combustível. Por outro lado quanto mais baixa for a viscosidade mais fácil se torna a bombagem do combustível, favorecendo a sua atomização, melhorando assim a formação e dispersão das gotículas [8].

Além de poder contribuir para uma combustão incompleta e para o aumento de depósitos na câmara de combustão, a viscosidade tem também influência na lubricidade do combustível, o que tem consequências em alguns componentes mecânicos, designadamente no desgaste da bomba de combustível e dos injetores [10].

Valores característicos da viscosidade cinemática de alguns combustíveis são indicados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Viscosidade cinemática de alguns combustíveis [10] [11].

Combustível	Viscosidade (ν), mm²/s
JME	4,8 – 5,56
PME	3,70
RME	4,83 – 5,63
SFME	4,03
SME	3,97 – 4,27
WCOEE	5,81
WCOME	5,78 – 6,0
Gasóleo (ULSD)	3,5

2.1.3.3 Índice de Cetano

O índice de cetano (IC) é um indicador adimensional que caracteriza a qualidade de ignição dos combustíveis utilizados em motores de ignição por compressão (motores diesel). Neste tipo de motores em que a combustão é iniciada com a ignição por compressão da mistura ar-combustível, o índice de cetano é o indicador primário da qualidade do combustível uma vez que descreve a sua facilidade de autoignição [10].

Teoricamente o IC encontra-se definido num intervalo compreendido entre 15 a 100. Estes limites são dados por dois combustíveis de referência usados na determinação experimental do índice de cetano: o hexadecano, também conhecido por n-cetano (cetano normal), muito sensível à ignição por compressão, ao qual é atribuído índice de 100, e o 2,2,4,4,6,8,8-heptametilnonano, também designado por isocetano, com elevada resistência à ignição, detém um IC de 15. Este índice traduz a percentagem, em volume, de cetano normal, numa mistura de n-cetano e isocetano que tenha as mesmas características de ignição que o combustível de teste [10].

O IC afeta diretamente o atraso de ignição, ou seja, o tempo decorrido entre o início da injeção de combustível e o início da autoignição da mistura, sendo que, quanto maior o atraso, menor o IC e vice-versa. Este valor deve ser mantido dentro de certos limites para que o motor funcione corretamente, o ideal será que se situe entre 41 e 56, mas nunca deverá ser superior a 65. Um valor demasiado baixo causa dificuldades no arranque do motor, provocando um funcionamento irregular e ruidoso, com

ciclos sem combustão ou com combustão incompleta, aquecimento lento e consequente aumento de emissões poluentes, especialmente emissões de hidrocarbonetos não queimados. Por outro lado, um IC muito elevado pode fazer com que a ignição ocorra prematuramente antes que a mistura se dê por completo, causando uma combustão incompleta e aumento de fumos, além de danos no injetor provocados pelo sobreaquecimento, já que o combustível pode inflamar demasiado perto deste. Um IC de 51, é o mínimo estabelecido na União Europeia tanto para biodiesel como para o gasóleo (EN 590) [10].

No que concerne ao biodiesel, o seu IC é maior do que o dos óleos vegetais de que é produzido, podendo o IC destes variar entre 34 e 42, estando o IC do biodiesel situado entre 39 e 67. De um modo geral, os ésteres etílicos têm maior IC do que os ésteres metílicos [10].

Tabela 2.5 - Índice de Cetano de alguns combustíveis. [10] [11]

Combustível	Índice de Cetano
JME	48
PME	n.d.
RME	56 – 61,8
SFME	45,5 – 58
SME	37 – 51,5
WCOEE	n.d.
WCOME	n.d.
Gasóleo (ULSD)	53

2.1.3.4 Poder Calorífico

O poder calorífico define a quantidade de energia disponível num combustível quando este é queimado. Podendo ser expresso numa base mássica (em joules por quilograma – J/kg) ou volúmica (em joules por litro – J/L), é uma das propriedades mais importantes, pois é a base para o cálculo da eficiência térmica de um motor que use esse combustível [6].

Esta propriedade apresenta variações dependendo da matéria-prima utilizada no fabrico de biodiesel. O poder calorífico dos ésteres de ácidos gordos aumenta com o número de átomos de

carbono e diminui com o grau de insaturação (número de ligações duplas). No caso dos ésteres insaturados o poder calorífico por unidade de massa é menor do que o dos ésteres saturados, mas devido à sua maior densidade o poder calorífico por volume é mais elevado. A presença de oxigénio nas moléculas dos ésteres diminui o poder calorífico do biodiesel na ordem dos 10 a 13% relativamente ao gasóleo. Na Tabela 2.6 encontram-se listados os poderes caloríficos de alguns combustíveis [10].

Devido ao facto de, nos motores de ignição por compressão o combustível ser contabilizado numa base volúmica, a energia contida em cada dose de combustível injetado é menor no caso do biodiesel pelo que o consumo específico de combustível será maior, contudo este fator é parcialmente compensado pelo facto da densidade do biodiesel ser maior do que a do gasóleo [10].

Tabela 2.6 - Poder calorífico de alguns combustíveis puros (Método UNE51123). Adaptado de [13]

	Gasóleo	Biodiesel
PCS [kJ/kg]	45280	39840
PCI [kJ/kg]	42540	37300
PCS [kJ/L]	38210	35290
PCI [kJ/L]	35890	33040

2.1.3.5 Lubricidade

A lubricidade de um fluido é a sua capacidade de reduzir o atrito entre superfícies sólidas em movimento relativo prevenindo o desgaste entre as áreas em contacto. É uma característica importante do combustível, pois tem grande influência no funcionamento do sistema de injeção de combustível, especialmente nos motores diesel modernos, onde este sistema opera a elevadas pressões e temperaturas, e com tolerâncias muito apertadas [12].

Tradicionalmente a lubrificação do sistema de injeção é efetuada pelo próprio combustível. No caso do gasóleo, a lubricidade não está apenas relacionada com a viscosidade e a temperatura. Devido a questões ambientais houve necessidade de, gradualmente, diminuir o elevado teor de enxofre de aproximadamente 5000 ppm para os atuais valores inferiores a 15 ppm. A remoção de oxigénio e azoto durante o processo de dessulfurização resultou num combustível de baixa lubricidade, o que levou a utilização de aditivos [12].

A adição de pequenas quantidades de biodiesel melhora significativamente a sua lubricidade. Pequenas quantidades, na ordem de 1 a 2% aumentam significativamente as propriedades lubrificantes do gasóleo [12].

A lubricidade do biodiesel varia consoante a matéria-prima que lhe dá origem, por exemplo, a lubricidade de biodiesel feito a partir de óleo de pinhão (*jatropha*) é das mais altas enquanto biodiesel de óleo de girassol tem lubricidade mais baixa [10]. A Tabela 2.7 traduz a variação da lubricidade de vários tipos de biodiesel, produzidos a partir de diferentes matérias-primas e respetivas misturas com gasóleo. Esta tabela apresenta o valor (em μm) da cicatriz de desgaste numa esfera (WS1.4), num teste efetuado numa máquina HFRR (*High Frequency Reciprocating Rig*), segundo a norma ISO 12156-1. Quanto menor for a cicatriz de desgaste maior será a lubricidade do fluido. Segundo a norma EN 590, o valor máximo da cicatriz de desgaste para combustíveis destinados aos motores diesel é de 460 μm (a 60°C) [12] [14].

Tabela 2.7 - Efeito lubrificante do biodiesel enquanto aditivo do gasóleo ULSD. Valores em μm (WS1,4). Adaptado de [10].

Biodiesel	Concentração de Biodiesel no Gasóleo, % (v/v)					
	0	0,25	0,5	1	2	100
JME	570	345	325	265	165	95
PME	570	490	380	265	185	135
RME	520	518	517	395	n.d.	n.d.
SFME	735	n.d.	n.d.	n.d.	429 (2% w/w)	n.d.
SME	n.d.	485	525	325	n.d.	n.d.

2.1.3.6 Ponto de Inflamação

Também conhecido por *Flash Point*, o ponto de inflamação define a temperatura mais baixa, à pressão atmosférica (101.3 kPa), à qual o combustível inflama por aplicação de uma fonte de ignição [10], o que traduz a facilidade do combustível formar, em conjunto com o ar, uma mistura inflamável [1]. O valor deste ponto é utilizado na classificação dos combustíveis para armazenagem, transporte e distribuição, de acordo com o seu nível de perigosidade.

O ponto de inflamação varia inversamente com a volatilidade do combustível. No caso do biodiesel é um indicador da presença de álcool em excesso uma vez que diminui com o aumento de álcool residual, sendo por isso um bom indicador de presença de etanol ou metanol, por exemplo a presença de 0.5% de metanol no biodiesel reduz drasticamente o seu ponto de inflamação de 170°C para 50°C [10].

No caso do ponto de inflamação ser usado na determinação do conteúdo de metanol, a norma ASTM *standard* impõe um valor mínimo de 130°C. Para o biodiesel os valores mínimos do ponto de inflamação estabelecidos são de 120°C na Europa, 100°C no Brasil e 93°C nos Estados Unidos. Alguns valores típicos do ponto de inflamação do gasóleo e do biodiesel produzido a partir de diferentes matérias-primas podem ser consultados na Tabela 2.8 [10].

O ponto de inflamação não afeta diretamente a combustão [10], contudo alguns autores referem que um ponto de inflamação baixo pode provocar uma explosão prematura, *timings* irregulares, explosão em excesso na camara de combustão, aumento de emissões e consequente desgaste dos componentes do motor [1].

Tabela 2.8 - Ponto de inflamação de alguns combustíveis [10] [15] [16].

Combustível	Ponto de Inflamação, °C
JME	170
PME	176
RME	166 – 179
SFME	85 – 177
SME	120 – 190
WCOEE	124
WCOME	141
Gasóleo	60 – 72

2.1.3.7 Propriedades de fluxo a frio

Um dos maiores obstáculos técnicos associados à utilização do biodiesel são as suas fracas propriedades de escoamento a frio quando comparado com o gasóleo. Estas propriedades afetam

tanto a manipulação como a operacionalidade do biodiesel. A manipulação refere-se à armazenagem, à preparação de misturas, ou a operações de bombagem do biodiesel, referindo-se a operacionalidade à utilização do biodiesel ou suas misturas em veículos ou equipamentos [15] pelo que será esta última de maior interesse para o âmbito deste trabalho.

De uma forma geral, todos os combustíveis para motores de ignição por compressão podem causar problemas de funcionamento nos motores devido às baixas temperaturas. Isto deve-se à formação de pequenos cristais, em suspensão na fase líquida, que podem obstruir parcialmente tanto os filtros como as linhas de combustível, dificultando a alimentação do motor. Em casos extremos, quando a exposição às baixas temperaturas é prolongada, por exemplo durante a noite, o sistema de alimentação pode ficar completamente obstruído devido à solidificação do combustível.

As propriedades de fluxo a frio dos combustíveis são caracterizadas pelos seguintes parâmetros: ponto de nuvem (*cloud point* – CP), ponto de fluidez (*pour point* – PP), ponto de entupimento de filtro (*cold filter plugging point* – CFPP) e viscosidade (ν) [10].

Ponto de nuvem (CP)

Ponto de nuvem define a temperatura à qual os cristais se começam a formar. Este ponto é atingido quando a temperatura é baixa o suficiente para que os cristais de cera sejam visíveis (diâmetro $\geq 0.5 \mu\text{m}$) e comecem a precipitar formando uma nuvem. O valor do ponto de nuvem é mais alto para o biodiesel do que para o gasóleo [10]. No caso do biodiesel este valor varia consoante a matéria-prima de que é produzido, apresentando valores que tipicamente variam entre -4 e 16°C , no gasóleo este valor é mais baixo situando-se entre os -25 e -15°C [15].

Ponto de fluidez (PP)

O ponto de fluidez é a temperatura à qual a aglomeração dos cristais é tal que impede o combustível de fluir, transformando-se num gel. Isto ocorre a temperaturas abaixo do ponto de nuvem, quando os microcristais se unem e formam grandes aglomerados. Tal como o ponto de nuvem, o ponto de fluidez do biodiesel varia consoante a matéria-prima da qual é obtido [10]. O biodiesel “gelifica” a temperaturas próximas dos 0°C , sendo que o gasóleo atinge este estado apenas aos -15°C [15].

Ponto de obstrução de filtro (CFPP)

O ponto de obstrução de filtro é o ponto de temperatura mais baixa à qual 20 ml de combustível conseguem atravessar um filtro durante 60 s, aplicando um vácuo de 2 kPa. Trata-se de um teste que emprega rápidas condições de arrefecimento, não refletindo por isso o limite real de temperatura de operacionalidade de um combustível, não levando também em conta os sistemas de combustível projetados para operar a baixas temperaturas. Ainda assim a determinação deste parâmetro é requerido pela maioria das normas, sendo o seu valor regulado em função das condições climáticas de cada região [10].

Um teste semelhante ao CFPP é o teste de fluidez a baixa temperatura (LTFT). A grande diferença encontra-se na velocidade de arrefecimento do combustível que ocorre a 1°C/h, refletindo assim condições mais próximas da realidade. Neste caso o volume da amostra é de 180 ml, o filtro mais fino e a pressão de vácuo maior. Valores relativos ao LTFT são ainda pouco conhecidos para o biodiesel, não estando ainda incluídos nas normas de qualidade [10].

Tabela 2.9 - Propriedades de fluxo a frio de alguns combustíveis [9] [10].

Combustível	CP, °C	PP, °C	CFPP, °C	LTFT, °C
PME	13 ... 16	14 ... 16	10 ... 14	-
RME	-3 ... 1	-9 ... 11	-10 ... -6	-
SME	-2 ... 3	-7 ... -1	-4 ... -2	-2 ... 0
SFME	0 ... 4	-4 ... -3	-4 ... -2	-
WCOME	-2 ... 3	-3 ... -6	-2 ... -9	-
Gasóleo	-16	-27	-18	-14

2.1.3.8 Compressibilidade

A compressibilidade de um fluido consiste na capacidade que este possui de variar o volume por si ocupado, em função da pressão a que é submetido. Este parâmetro representa-se pelo símbolo k , sendo o seu valor uma constante material calculada pela equação (2.1), que representa o inverso do módulo de compressibilidade, o qual representa a razão entre a pressão exercida e a percentagem da diminuição do seu volume [17].

$$k = -v \times \frac{dv}{dp} \quad (2.1)$$

A compressibilidade exprime-se em unidades inversas de pressão, por exemplo, em m^2/N , sendo módulo de compressibilidade expresso em unidades de pressão, por exemplo em MPa [17]. Este parâmetro pode ser medido diretamente pela observação da dilatação do combustível sob pressão ou determinado pela medição da velocidade do som no fluido [18].

No caso dos combustíveis o módulo de compressibilidade influencia o seu comportamento durante o processo de injeção. Como o combustível é injetado a alta pressão, este parâmetro afeta a quantidade de combustível injetado. Isto tem particular interesse no caso dos combustíveis alternativos uma vez que estes possuem estruturas moleculares diferentes dos combustíveis derivados do petróleo. No caso do biodiesel, este apresenta uma compressibilidade bastante mais baixa do que a do gasóleo, o que pode ser explicado pela presença de grupos carboxílicos e um maior grau de insaturação [18].

Em termos do funcionamento do motor, o conhecimento desta propriedade permite corrigir o efeito do combustível no parâmetros de injeção, designadamente o tempo de injeção, o que tem consequências nas emissões de NO_x [18]. O gráfico da Figura 2.4 apresenta uma variação do módulo de compressibilidade relativo ao gasóleo, biodiesel e HVO, a diferentes pressões.

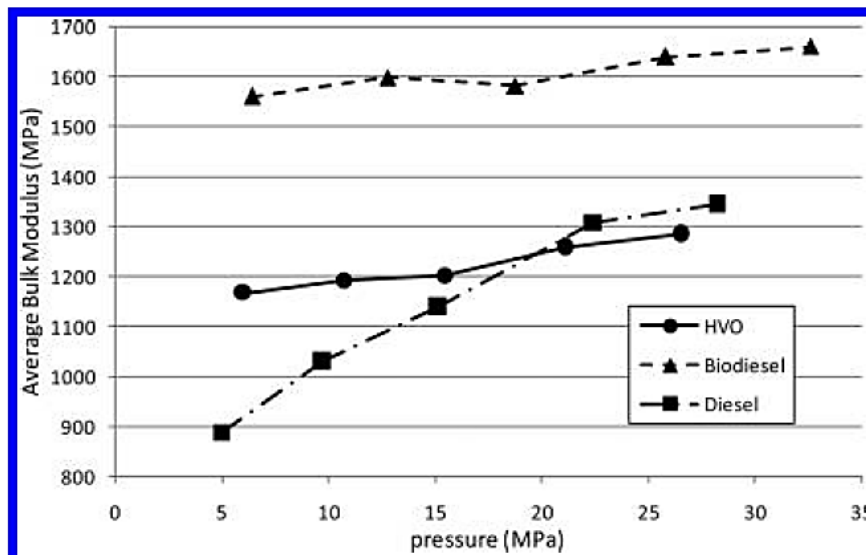


Figura 2.4 - Módulo de compressibilidade para combustíveis puros [18].

2.1.3.9 Compatibilidade com Materiais

O biodiesel possui características químicas diferentes do gasóleo pelo que é expectável que a interação com os diversos materiais seja diferente para os dois combustíveis. O facto de o biodiesel derivar de diferentes matérias-primas, e consequentemente a sua composição química variar em função disso, torna a análise deste parâmetro um pouco mais complexa.

Nos automóveis, o sistema de alimentação de combustível é o mais afetado pois é constituído por diversos materiais que se encontram em permanente contacto com o combustível. Estes materiais agrupam-se essencialmente em ligas ferrosas, ligas metálicas não ferrosas e elastómeros. Durante o funcionamento do motor o combustível entra em contacto com estes materiais em diferentes condições de carga, velocidade e temperatura, bem como em estados físicos e de deslizamento diferentes, o que provoca desgaste, corrosão e degradação dos materiais [19].

De um modo geral o biodiesel é mais corrosivo do que o gasóleo, contudo não há evidências de que o grau de corrosão observado com a utilização do biodiesel não esteja dentro dos limites aceitáveis para os componentes dos automóveis. A natureza corrosiva do biodiesel aumenta com a sua concentração nas misturas, bem como com o nível de oxidação deste combustível. A presença de água e de impurezas aumenta também a corrosibilidade do biodiesel [20]. No caso dos metais, as ligas de cobre, presentes em diversos componentes como bomba de combustível, rolamentos, buchas, entre outros, são mais propensas à corrosão do que as ligas ferrosas ou ligas de alumínio, sendo os revestimentos de ligas de chumbo, normalmente aplicados nas chapas de aço que constituem o depósito de combustível, também muito afetados pelos biodiesel. A utilização de materiais como o latão, bronze, estanho e zinco, a par do chumbo e do cobre, deve ser evitada no sistema de combustível, pois além de serem corroídos pelo biodiesel também aceleram a sua oxidação. Por outro lado, o aço inoxidável, o aço ao carbono e o alumínio são materiais recomendados para utilização com biodiesel [20].

Da utilização de biodiesel ou da alteração da composição do gasóleo podem também resultar problemas em materiais não metálicos, nomeadamente em juntas, vedações, *o-rings* e outros elastómeros presentes no sistema de combustível. A compatibilidade destes componentes com o gasóleo é já bem conhecida, contudo é ainda muito limitada a informação existente sobre a compatibilidade dos elastómeros com o biodiesel [20].

Como já se referiu, o biodiesel é uma mistura de ésteres alquílicos, ao passo que o gasóleo é constituído por uma mistura de hidrocarbonetos. Os ésteres, principal constituinte do biodiesel, podem

hidrolisar na presença de água, formando grupos carboxílicos, os quais afetam os elastômeros [20]. Diversos tipos de elastômeros estão presentes nos sistemas de alimentação de combustível de um motor. Do depósito ao sistema de injeção podem encontrar-se materiais tão diversos como borracha natural, polipropileno, polivinil, TYGON ou fluorossilicone entre outros. Todos estes materiais apresentam incompatibilidades com o biodiesel, podendo sofrer alterações com o seu contato com este combustível, sendo provável encontra-los em veículos mais antigos, especialmente os de fabrico anterior a 1996. Por outro lado, materiais como o TEFLON, Nylon 6/6 e VITON apresentam boa compatibilidade com o biodiesel, pelo que podem substituir os primeiros [2]. A Tabela 2.10 apresenta alguns dos materiais mais utilizados e a respetiva compatibilidade e efeito comparado com o gasóleo.

Tabela 2.10 - Compatibilidade de diferentes materiais com o biodiesel. Adaptado de [2].

Materiais	Percentagem de biodiesel	Efeito comparado com gasóleo
Teflon	B100	Pequena alteração
Nylon 6/6	B100	Pequena alteração
Nitrilo	B100	Dureza reduzida 20% Dilatação incrementada 18%
Viton A401-C	B100	Pequena alteração
Viton GFLT	B100	Pequena alteração
Fluorossilicone	B100	Pequena alteração na dureza Dilatação incrementada 7%
Fluoretano	B100	Pequena alteração na dureza Dilatação incrementada 6%
Polipropileno	B100	Dureza reduzida 10% Dilatação incrementada 8 a 15%
Polivinil	B100	Muito pior
	B50, B40, B30	Pior
	B20, B10	Comparável
Tygon	B100	Pior

2.1.3.10 Estabilidade do Biodiesel

A estabilidade em armazenamento define a capacidade de um combustível resistir às alterações químicas durante longos períodos de armazenamento. Estas mudanças geralmente consistem em reações de oxidação por contacto com o oxigénio presente no ar, podendo a qualidade do biodiesel ser também afetada pela degradação hidrolítica, por contacto com a água [10].

Ácidos gordos insaturados, principalmente os polinsaturados, têm grande tendência para oxidar, pelo que a matéria-prima utilizada na produção do biodiesel tem influência neste parâmetro. Estas reações de oxidação podem ser catalisadas por alguns metais presentes no material que constitui o reservatório, mas também pela ação da luz. Destas reações resultam hidroperóxidos que por sua vez produzem ácidos gordos de cadeia curta, aldeídos e cetonas. As reações de oxidação aumentam a viscosidade e o grau de acidez do biodiesel, sendo verificadas também alterações na sua cor, passando de amarelo para um acastanhado, bem como a formação de depósitos sólidos que podem causar a obstrução de linhas e filtros de combustível. Por outro lado, uma diminuição do poder calorífico e da lubricidade são também verificados. Todavia, a estabilidade oxidativa do biodiesel pode ser melhorada através adição de antioxidantes. Butil-hidroquinona terciária (TBHQ), Hidroxianisol butilado (BHA) e hidroxitolueno butilado (BHT) são alguns dos antioxidantes utilizados [10].

Conforme foi já referido, a presença de água contribui para a degradação do biodiesel, o qual é bastante mais higroscópico do que o gasóleo. A sua acumulação pode ocorrer durante o armazenamento e transporte, sendo absorvida quando a temperatura é alta, precipitando depois a temperaturas mais baixas. A presença de água aumenta a concentração de ácidos gordos livres, aumentando a acidez do biodiesel, o que contribui para a corrosão dos componentes metálicos constituintes do sistema de combustível, podendo também catalisar outras reações de degradação como a oxidação ou reverter a transesterificação. O crescimento microbiano e a formação de sedimentos são também consequência da presença de água no biodiesel [10].

A estabilidade térmica está relacionada com a estabilidade às altas temperaturas e pressões a que o combustível está sujeito no motor, ou seja, é um indicador da degradação do combustível quando este está sujeito a estas condições, durante um período curto de tempo, como as que é sujeito no sistema de injeção de um motor diesel moderno. Estudos realizados mostram que o biodiesel apresenta uma boa estabilidade térmica quando comparado com gasóleo, produzindo menos resíduos carbonosos nos injetores [21].

2.2 EFEITO DO BIODIESEL NO MOTOR DIESEL

O biodiesel e o gasóleo são combustíveis que apresentam propriedades não muito diferentes no que diz respeito à viscosidade, poder calorífico, índice de cetano, etc. [8], como de resto se pode constatar da leitura do capítulo anterior. Por esta razão o biodiesel pode ser usado como combustível em motores diesel convencionais, no estado puro (B100) ou em misturas com gasóleo em qualquer proporção, sem que sejam necessárias alterações relevantes nos motores, podendo as misturas com teor de biodiesel até 20% (B20) ser usadas em praticamente todos os motores diesel, sem restrições, sendo compatíveis com a maioria dos sistemas de armazenamento e equipamento de distribuição [8] [22] [23] [24].

Comparando as propriedades dos dois combustíveis, apresentadas anteriormente e sumariadas na Tabela 2.11, podem ver-se algumas similaridades mas também algumas diferenças. Estas diferenças em algumas das propriedades tais como viscosidade, poder calorífico, índice de cetano, podem resultar em diferentes características da combustão bem como influenciar a atomização e a mistura do combustível com o ar [23] [25], o que se analisará com mais detalhe nos subcapítulos seguintes.

Tabela 2.11 - Comparação das propriedades do biodiesel e do gasóleo. Adaptado de [8].

Propriedade	Biodiesel	Gasóleo
Massa volúmica, kg/m ³	860 ... 895	840 ... 860
Índice de Cetano	46 ... 70	47 ... 55
Ponto de Nuvem, °C	-11 ... 16	-17 ... -8
Ponto de Fluidez, °C	-15 ... 13	-36 ... -30
Ponto de Inflamação, °C	135 ... 150	52 ... 77
Enxofre, %	0,0000 ... 0,0024	0,04 ... 0,001
Viscosidade (a 40°C), mm ² /s	3,6 ... 5,0	1,9 ... 3,8
PCS, MJ/kg	39,3 ... 39,8	45,3 ... 46,7

2.2.1 Combustão

O biodiesel é um combustível oxigenado, contendo entre 6 e 12% de oxigênio dependendo do tipo de óleo usado como matéria-prima, pelo que proporciona uma combustão mais eficiente e uma redução significativa da maioria das emissões de escape, particularmente as emissões de fumo (partículas) normalmente associadas aos motores diesel [22]. Porém, sendo um combustível oxigenado, o seu conteúdo energético é menor quando comparado com o gasóleo, tendo o biodiesel cerca de 90% do poder calorífico deste, medido numa base volumétrica, pelo que para obter a mesma eficiência e a mesma potência, mais combustível tem que ser queimado [8]. Conforme o descrito anteriormente, estas e outras propriedades afetam a as características de combustão deste biocombustível, vejamos as principais:

2.2.1.1 Atraso de Inflamação

O atraso de inflamação é definido como o intervalo de tempo decorrido entre o início da injeção e o início da combustão, sendo normalmente medido em graus de rotação da cambota [26]. Este processo ocorre durante a injeção de combustível, sendo necessário esperar que ele evapore, se misture com o ar circundante e reaja, iniciando-se a combustão da mistura [4]. Este parâmetro é particularmente importante na combustão, exercendo grande influência no projeto e desempenho do motor [27]. A Figura 2.5 e a Figura 2.6, representam graficamente a ocorrência deste fenómeno no processo de combustão no motor diesel.

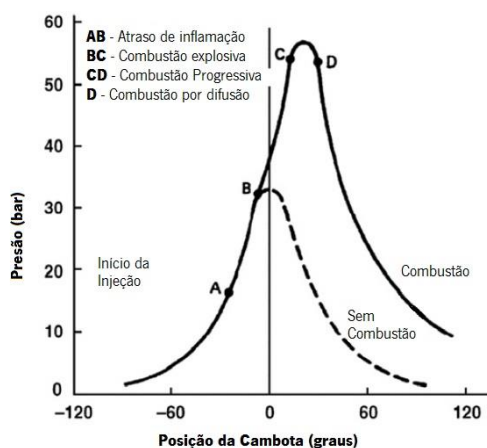


Figura 2.5 - Diferentes etapas da combustão nos motores de ignição por compressão [4] [27].

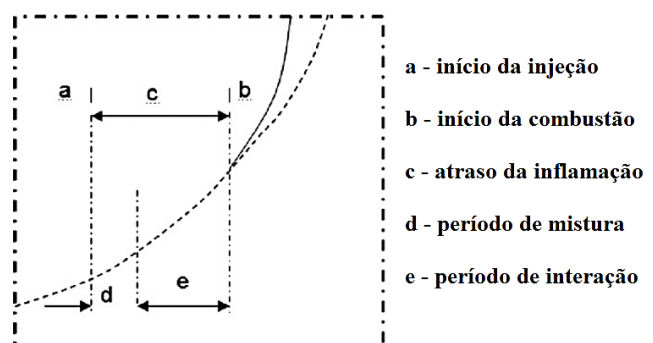


Figura 2.6 - Atraso da inflamação. Adaptado de [27].

O atraso de inflamação é principalmente influenciado pelo índice de cetano do combustível. É sabido que combustíveis com índice de cetano elevado entram em ignição mais facilmente apresentando por isso um menor atraso de inflamação [28]. É expectável que isto se verifique com a utilização do biodiesel, sabendo que o seu índice de cetano é tipicamente mais elevado do que o do gasóleo. Conforme mostra o gráfico da Figura 2.7, o atraso de inflamação é menor para valores de IC mais elevados.

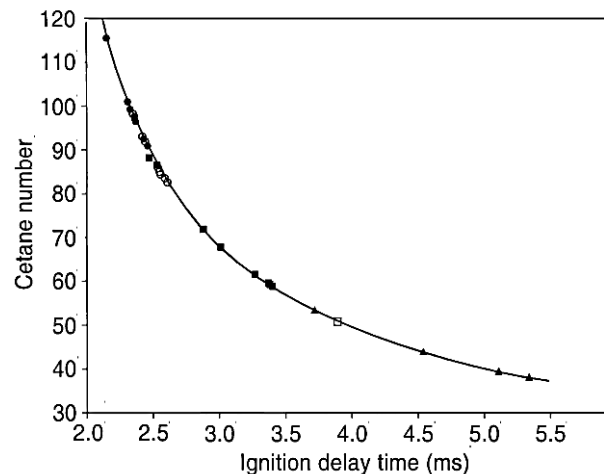


Figura 2.7 - Efeito do IC no atraso de inflamação [12].

Quantificando este atraso, é referido em [26] que dois tipos de biodiesel, um obtido a partir de resíduos de óleo de palma, e outro a partir de óleo de canola, apresentam atrasos de 7.5°CA e 8.0°CA respetivamente, ambos inferiores ao gasóleo que, no mesmo estudo, apresentou um atraso de 8.25°CA , o que se verificou num motor atmosférico de 6 cilindros, com injeção direta. Resultados semelhantes para os mesmos tipos de biodiesel são também apresentados em [27] onde são ainda referenciados para o biodiesel obtido de óleo de soja, atrasos mais curtos em 1.06°CA quando comparados com gasóleo. Outros estudos apresentados por este autor apontam ainda atrasos mais curtos 0.6°CA para biodiesel de óleo de soja quando comparado com gasóleo.

Existem no entanto outros fatores que influenciam o atraso de inflamação, tais como o conteúdo de aromáticos, temperatura de destilação, bem como velocidade e carga do motor, e ainda a compressibilidade nos tubos do sistema de injeção. O atraso de ignição aumenta com o aumento de aromáticos no combustível, o que se verifica no caso do gasóleo cujo conteúdo de aromáticos é maior do que no biodiesel. A temperatura de destilação do biodiesel, por ser mais elevada do que a do gasóleo, pode também diminuir o atraso de ignição, diminuindo a probabilidade de ocorrência de *knock* (grilar) [26] [4]. Por outro lado, maiores atrasos de ignição aparecem com o aumento da velocidade do

motor, continuando ainda assim a ser menores do que os verificados com a utilização de gasóleo [26]. Fenómeno contrario verifica-se relativamente à carga do motor, sendo reportado por vários autores uma redução do atraso de ignição com o aumento da carga do motor, o que explicam como podendo ser devido a altas temperaturas da parede da câmara da combustão e reduzida diluição dos gases de escape em cargas maiores [26]. Além da carga do motor, o aumento da percentagem de biodiesel nas misturas com gasóleo faz também diminuir o atraso de inflamação, o que é traduzido pelos dados do gráfico da Figura 2.8 [27]. Embora o autor não o refira, poderá isto dever-se, em parte, ao efeito da compressibilidade.

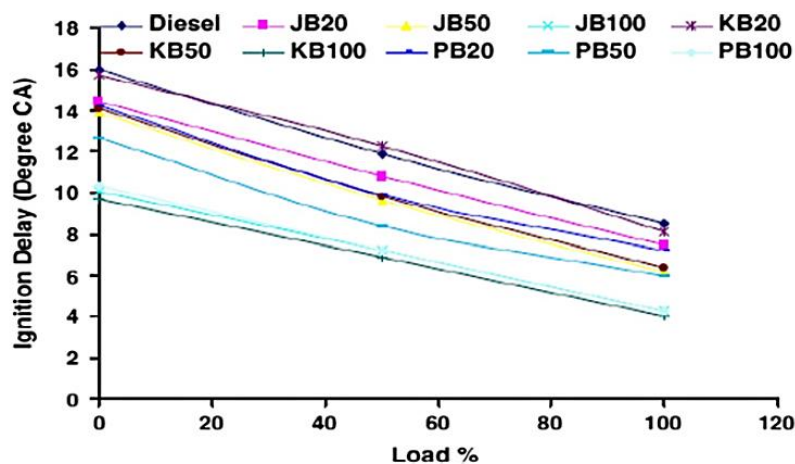


Figura 2.8 - Efeito da carga da motor e do teor de biodiesel no atraso de inflamação. [27]

2.2.1.2 Avanço da Injeção

Alterações do tempo de injeção e do início da combustão afetam também o atraso de inflamação, o que pode acontecer devido a alterações nas propriedades do combustível [27]. Em condições normais, com o motor quente rodando a velocidade baixa ou média, o avanço mínimo é de 10 ou 15° antes do ponto morto superior (PMS). Se este avanço for maior, ou seja, se a injeção se realizar antes desse ponto, a pressão e temperatura serão relativamente baixas, o que aumentará o atraso da inflamação. Por outro lado, se o avanço for menor, a pressão e temperatura serão mais elevados, contudo, passando o PMS estas baixarão, aumentando igualmente o atraso de inflamação [4].

A baixa compressibilidade, viscosidade e densidade do biodiesel conduzem a um avanço da injeção. Para estas propriedades (exceto a compressibilidade, que é menor) o biodiesel apresenta valores mais elevados do que o gasóleo, sendo que o efeito de amortecimento do fluido sobre a agulha do injetor é menor, tornando assim mais rápido o movimento desta e consequentemente a injeção do

combustível. Este avanço da injeção (injeção mais cedo) causa uma combustão mais rápida o que está relacionado com o aumento da pressão máxima e temperatura na câmara de combustão, bem como as emissões poluentes [28].

A título de exemplo, segundo autores citados em [26], um avanço de 17.5°CA foi calculado para o biodiesel, sendo o avanço de 14.60°CA para uma mistura de B20 e de 13.5°CA para o gasóleo puro. Ainda em [26] são referidos inícios de injeção ocorridos mais cedo 0.75°CA (biodiesel de resíduos de óleo de palma) e 1.25°CA (biodiesel de óleo de canola) do que os ocorridos com a utilização de gasóleo.

2.2.1.3 Pressão Dentro do Cilindro

A pressão no interior dos cilindros é uma fonte importante de informação no desenvolvimento e calibração do motor. A medição deste parâmetro permite a determinação de outros parâmetros igualmente vitais tais como pico de pressão, diagramas P-V, pressão média efetiva, taxa de libertação de calor, duração da combustão, atraso de inflamação, entre outros. No motor de ignição por compressão, a pressão no cilindro depende da fração de combustível queimado durante a fase inicial da combustão. A pressão no cilindro caracteriza a capacidade que o combustível possui de se misturar com o ar e arder. Elevados picos de pressão e taxas máximas de aumento de pressão correspondem a uma grande quantidade de combustível queimado na fase de pré-mistura [26].

Segundo o referido em [26] o pico de pressão resultante da utilização de biodiesel é ligeiramente maior quando comparado com o gasóleo. Por outro lado a taxa de aumento de pressão é maior com a utilização do gasóleo, devido ao maior atraso de inflamação e menor duração da combustão. Conclusões semelhantes são relatadas em [29] que refere que o pico de pressão do biodiesel é mais elevados do que do gasóleo. Contudo este autor refere que a taxa máxima de aumento de pressão é semelhante para os dois tipos de combustível. Seguindo esta tendência de resultados, também na experiência relatada em [30] é referido que o pico de pressão resultante da utilização de biodiesel é ligeiramente mais elevada relativamente ao gasóleo, o que se poderá dever ao facto do processo de combustão se iniciar mais cedo em resultado do maior efeito de lubrificação do biodiesel bem como das restantes propriedades físicas. Não sendo diretamente referido pelo autor, poderá estar aqui subentendido o efeito do maior IC do biodiesel e da sua menor compressibilidade. Os gráficos a) e b) da Figura 2.9 traduzem os resultados obtidos nesse estudo relativamente à pressão no interior do

cilindro, taxa de aumento de pressão, e sua variação com a carga para as diversas posições da cambota, os quais são consistentes com o mencionado na restante literatura.

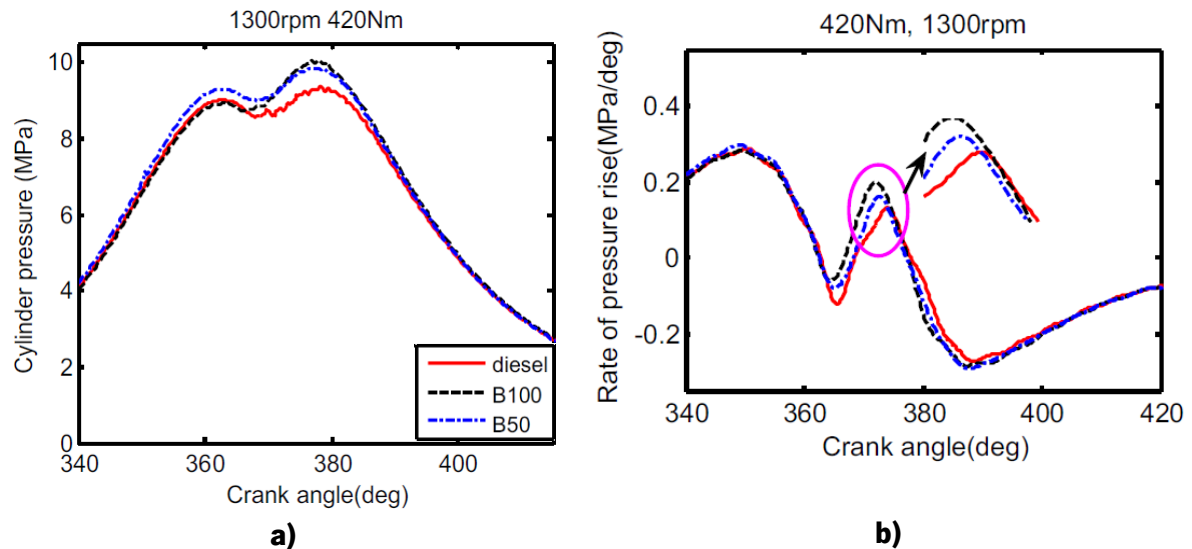


Figura 2.9 - Variação da pressão dentro do cilindro **a)** e taxa de aumento de pressão **b)** com a posição da cambota. Adaptado de [30]

2.2.1.4 Taxa de Liberação de Calor

A análise do padrão de liberação de calor de um combustível é útil para obter informações sobre o processo de combustão no motor. Exemplos disso são o tempo de início de combustão, taxas de liberação de calor em várias etapas, cálculo dos requisitos de arrefecimento do motor ou ainda a análise de formação de NO_x dentro da câmara de combustão.

Diversos fatores, tais como o conteúdo de oxigênio do combustível, a velocidade e carga do motor, têm influência no padrão de liberação de calor. A taxa de liberação de calor do biodiesel é menor do que no caso do gasóleo, para o que contribui o menor poder calorífico do biodiesel [26], e o menor atraso de inflamação, o que acaba por se verificar, de um modo geral, para todos os tipos de biodiesel [27]. Além disso o pico máximo de liberação de calor ocorre mais cedo no caso do biodiesel [29]. Por exemplo, é apresentado em [27] uma taxa de liberação de calor máxima, relativa ao gasóleo, de 71,4 J/°CA ocorrida 6° antes de PMS, apresentando para o biodiesel o valor de 51,4 J/°CA ocorrida 8° antes de PMS, tendo sido usadas para ambos as mesmas características de injeção.

Esta tendência de resultados é demonstrada no estudo relatado em [31] onde as máximas taxas de liberação de calor obtidas para o biodiesel foram 4,2%, 1,8% e 4,2% menores do que o gasóleo,

ocorridas às 800 rpm, 1200 rpm e 2400 rpm respetivamente, em testes realizados num motor com sistema de injeção *common rail*, compatível com a norma EURO IV. Contudo, no estudo documentado em [30], em que foi utilizado um motor de 4 cilindros, turbo, de injeção direta (sistema de bomba de injeção), não é tão evidente a diferença, embora a baixas cargas, a taxa de libertação de calor seja menor para o biodiesel, a cargas elevadas este apresenta uma taxa de libertação de calor ligeiramente maior do que o gasóleo o que, segundo este autor, resulta da queima completa da mistura ar-combustível devido à presença de moléculas de oxigénio adicionais.

2.2.2 Sistema de Injeção

O sistema de injeção é o principal responsável pelo desempenho do motor diesel, sendo a sua principal função a formação da mistura ar-combustível. Esta mistura deve ser o mais homogénea possível e deve ser fornecida em quantidade adequada a uma certa carga. O combustível é injetado sob forma de *spray*, formado pelo injetor. Este *spray* deverá possuir determinadas características, de modo a que sejam satisfeitas condições adequadas de pulverização, penetração e gradiente de injeção, otimizando assim o processo de combustão, reduzindo o ruído e emissões poluentes [4].

Do ponto de vista do combustível, a viscosidade, tensão superficial e densidade, são as principais propriedades que afetam as características do *spray*, pelo que a alimentação de um motor diesel com combustível cujas propriedades são diferentes das do gasóleo afetará essas características [32]. Além disso, as condições de injeção tais como pressão, velocidade, diâmetro do orifício do injetor, entre outras, têm também influência na atomização, penetração, distribuição e tamanho das gotas, bem como ângulo do *spray* [4].

2.2.2.1 Penetração e Ângulo do *Spray*

A penetração do *spray* é definida pela distância axial máxima entre o bico do injetor e o limite do *spray*, sendo o ângulo do cone do *spray* medido pelas duas linhas retas formadas na direção axial pelo bico do injetor e o limite exterior da pulverização, conforme esquematizado na Figura 2.10.

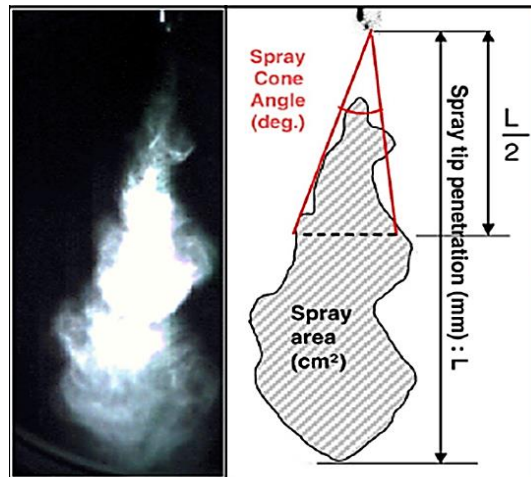


Figura 2.10 - Penetração e ângulo do spray. Adaptado de [33].

A penetração das gotas de combustível no ar da câmara de combustão depende da sua velocidade e massa bem como da massa volúmica do ar. Quanto maiores forem a massa e o tamanho da gota, mais longo será o seu trajeto, pois terá maior energia cinética e maior massa para evaporar. O aumento da pressão de injeção ou a diminuição da massa específica são variáveis que permitem aumentar a velocidade [4].

Outro fator a ter em conta é o diâmetro do orifício do injetor. Diâmetros reduzidos originam gotas de menor dimensão. Como são as gotas maiores as que proporcionam maior penetração não deverão ser utilizados orifícios demasiado pequenos quando se pretendem elevadas penetrações [4].

Normalmente o biodiesel apresenta maior penetração e um ângulo de *spray* mais estreito do que o gasóleo, o que se deve a sua mais elevada viscosidade, tensão superficial e massa volúmica, sendo que a sua penetração também aumenta com a percentagem de biodiesel nas misturas [32]. Conclusões semelhantes são relatadas em [25] e [34].

A título de exemplo apresenta-se de seguida os resultados de [25] relativos ao estudo às características do *spray* do gasóleo e dois tipos de biodiesel (produzidos a partir de óleo de palma, e de óleos de cozinha usados), no qual é ainda referido que a área projetada e volume do *spray* são menores no caso do biodiesel, o que se atribui principalmente ao menor ângulo do *spray*.

2.2.2.2 Distribuição e Tamanhos das Gotas

Condições ótimas de pulverização requerem por um lado, dimensões médias mínimas para as gotas, por outro o máximo de massa em gotas de menor diâmetro. Isto visa reduzir o atraso de

inflamação e melhorar a mistura ar-combustível, pelo que interessa dispor-se de *sprays* com algumas gotas de dimensões mais elevadas dirigidas a pontos mais distantes do injetor. Assim é importante não só referir o Diâmetro Médio de *Sauter* (DMS), ou seja a razão entre o volume de líquido do *spray* e a sua área superficial, mas também conhecer a distribuição de tamanhos do *spray* [4].

O DMS é influenciado principalmente pela viscosidade e tensão superficial do combustível, embora a primeira exerça maior influência. Uma viscosidade alta conduz a uma velocidade de injeção mais baixa e a produção de gotas de tamanho maior, por outro lado uma baixa tensão superficial permite que o *spray* se divida em gotas mais pequenas. Quando comparado com o gasóleo, o biodiesel forma gotas maiores, o que se deve à sua viscosidade e tensão superficial serem mais elevadas, pelo que tipicamente o seu DMS é maior do que o do gasóleo [34].

Estudos relatados em [34] e [25] mostram também a variação do DMS com a pressão de injeção, sendo visível nas Figura 2.11 que este parâmetro decresce com o aumento da pressão de injeção. Um estudo à distribuição dos tamanhos das gotas é apresentado em [34], do qual se reproduz o gráfico da Figura 2.12 onde é notória a diferença existente entre o biodiesel e o gasóleo.

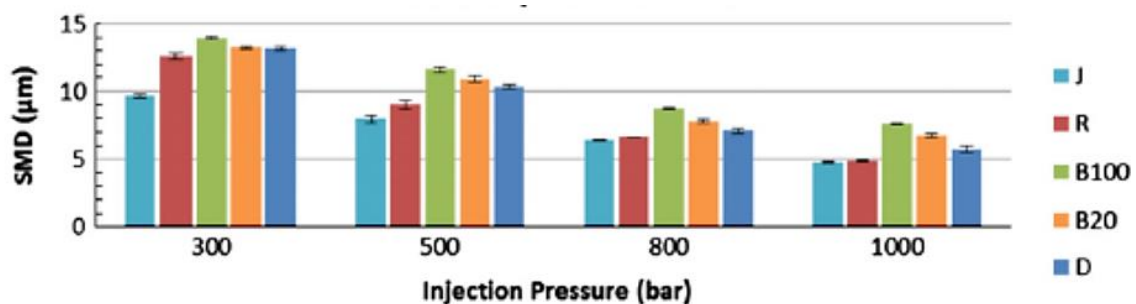


Figura 2.11 - Variação do DMS com a pressão de injeção [34].

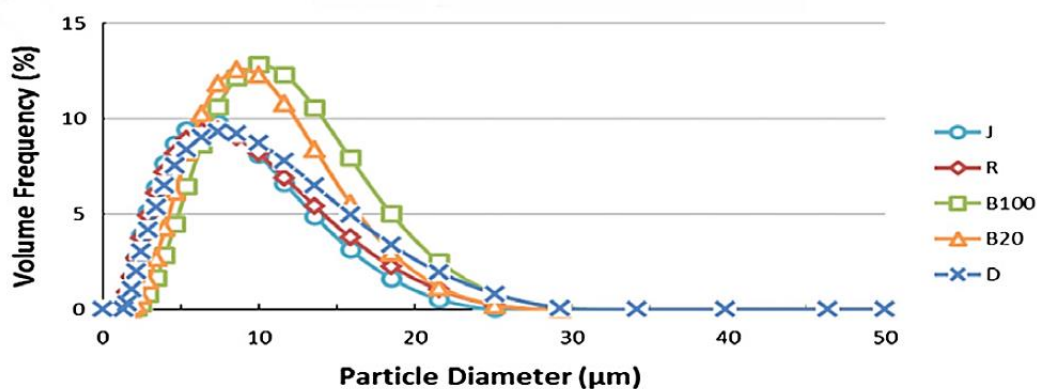


Figura 2.12 - Distribuição de tamanhos de gotas para gasóleo e biodiesel. [34]

2.2.3 Desempenho do Motor

As características de desempenho do motor são o principal critério que define a aptidão de um combustível [26]. Como se pode verificar da leitura das secções anteriores, o desempenho do motor alimentado com biodiesel depende largamente da combustão, qualidade da mistura ar-combustível, pressão de injeção, entre outras singularidades, as quais podem fazer os resultados variar de motor para motor [35].

De um modo geral o poder calorífico do biodiesel é menor do que o do gasóleo, como de resto foi já mencionado anteriormente, por esse motivo uma quantidade maior de combustível é necessária para a mesma potência do motor [10] [36].

A eficiência energética do motor é independente do consumo de combustível, sendo a potência dependente da densidade energética deste, pelo que com a utilização de biodiesel, além de uma perda de potência, é expectável um aumento dos consumos de combustível usando os mesmos caudais que o motor original a gasóleo [10]. Mas vejam-se as secções seguintes, onde estes e outros parâmetros de desempenho são abordados com mais pormenor.

2.2.3.1 Potência/Binário

As especificações de um motor são normalmente definidas pelos valores de binário (B) e potência (\dot{W}) máximos. O binário quantifica o trabalho produzido pelo motor, representando a potência, a taxa a que esse trabalho é produzido, sendo esta última calculada pela equação (2.2) [4].

$$\dot{W} = B \times \Omega = 2\pi NB \quad (2.2)$$

Da revisão da literatura efetuada por diversos autores resulta a ideia predominante de que à utilização de biodiesel em motores Diesel, simples ou em misturas com gasóleo, está associada uma redução na potência e binário (Figura 2.13), a qual se evidencia com o aumento do teor de biodiesel. Segundo o referido em [26] esta redução de desempenho é atribuída principalmente ao menor poder calorífico deste combustível, elevada densidade e viscosidade face ao gasóleo, que levam a ocorrência de problemas de fluidez do combustível, combustão menos eficiente e baixa eficiência térmica. É estranho que o autor refira “combustão menos eficiente” uma vez que o biodiesel contém oxigénio na sua composição, contudo poderá deduzir-se que tal resulte de problemas na injeção decorrentes de algumas das suas propriedades físicas. Embora o autor não o refira, da leitura do artigo presume-se que o caudal de biodiesel utilizado seja o original do motor diesel.

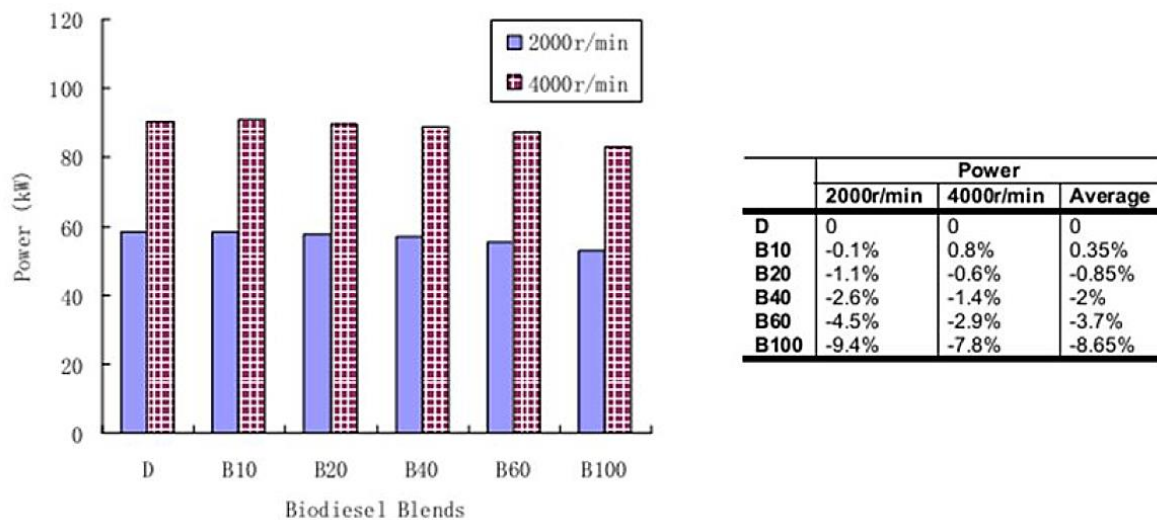


Figura 2.13 - Variação da potência produzida associada ao teor de biodiesel utilizado. [36]

De facto reduções maiores ou menores no desempenho são relatadas por vários investigadores relativamente à utilização de biodiesel em motores diesel. Em média a redução de potência em motores com tecnologia *common-rail*, alimentados com B100, situa-se nos 12.2% numa faixa de velocidades entre as 1600 e 3600 rpm, face ao seu funcionamento com gasóleo [26]. No entanto reduções médias de 4.3% no binário e 4.5% na potência de um motor diesel sobrealimentado com injeção direta são também relatadas por este autor [26] o qual reporta ainda estudos onde se observaram reduções máximas de potência da ordem dos 25%, embora neste caso possa tratar-se de motores em que o sistema de injeção seja constituído por bomba e injetor, em que a menor compressibilidade do biodiesel e o seu maior IC fazem com que o início da combustão seja excessivamente avançado (muito antes de PMS), acabando por ter o efeito de “travão” na subida do pistão. Todavia, estudos onde se registam ganhos do desempenho do motor alimentado com biodiesel são também mencionados.

É referido num dos estudos citados em [26] um aumento de potência de cerca de 9% a velocidades abaixo das 4800 rpm, o que se verificou num motor diesel de injeção indireta [37]. Também em [35] se podem encontrar referências a estudos que concluem um aumento de 1.5% a 2.6% nos valores de binário que ocorrem principalmente a baixas velocidades (entre 1100 e 1600 rpm), o que se registou em testes efetuados num motor diesel de injeção direta, sobrealimentado [38]. Consta ainda de [35] que estes resultados contraditórios poderão ser atribuídos igualmente às

propriedades do combustível utilizado, tais como densidade, viscosidade, composição, ou ainda às condições de teste.

Dentro da gama dos valores referidos encontram-se também os resultados obtidos no estudo documentado em [23], no qual se comparou o efeito do biodiesel em dois veículos semelhantes mas com diferentes sistemas de injeção, em que um dos modelos utiliza um sistema de injetor-bomba, e noutro, um sistema *common-rail*. Também aqui é registada uma redução nos valores de potência e binário em ambos os veículos alimentados com biodiesel puro (B100) face à utilização de gasóleo (B5). No caso, e relativamente à potência, é referida uma redução de 2.3% e 11% relativas aos veículos equipados com injetor-bomba e sistema *common-rail* respetivamente. Já no que concerne aos valores de binário a diferença indicada é menor, sendo registada uma redução no valor deste parâmetro de 6.2% para a viatura equipada com injetor-bomba, e de 7.8% para a portadora do sistema *common-rail*. Apesar da evidente redução de desempenho com a utilização de B100, é observada uma redução bastante acentuada nos valores de potência relativamente ao veículo equipado com sistema *common-rail*, à qual o autor atribui à eventual necessidade de se alterar os parâmetros de injeção, concluindo-se ainda deste estudo que o B100 parece não se adaptar bem a este sistema, principalmente quando o motor opera a elevadas velocidades [23].

2.2.3.2 Consumo Específico

O consumo específico de combustível é um dos parâmetros importantes a ter em conta no desempenho de um motor. É normalmente expresso em g/kWh, ou seja define a quantidade de combustível necessária para se obter uma unidade de potência por uma unidade de tempo. Este parâmetro é inversamente proporcional ao rendimento térmico. Todavia este não é o parâmetro ideal para comparar combustíveis com poderes caloríficos diferentes, como é o caso do gasóleo e do biodiesel [29]. Ainda assim, se o rendimento térmico se mantiver, para as mesmas condições de funcionamento do motor, é expectável que o consumo específico de combustível apresente um aumento que rondará os 14% em relação ao gasóleo, segundo este autor, o que corresponde ao superior poder calorífico deste, medido numa base mássica. Por outras palavras, o menor poder calorífico do biodiesel poderá ser compensado por um aumento no consumo de combustível [39].

De facto, de um modo geral, o aumento no consumo específico é atribuído ao menor poder calorífico do biodiesel e possivelmente a sua maior densidade relativamente ao gasóleo, assim como a atomização e pressão de injeção exercem também algum efeito neste parâmetro [29].

A maioria da literatura mostra que o consumo específico é mais elevado com a utilização do biodiesel comparativamente ao gasóleo [29], facto também mencionado em [30]. Este aumento é geralmente proporcional à redução do poder calorífico do combustível, quantificando-se em cerca de 14% numa base mássica (9% numa base volumétrica), segundo o referido em [39].

Resultados semelhantes constam também de [35] onde se mencionam aumentos superiores a 14% no consumo específico, embora este autor apresente estudos efetuados num motor de 4 cilindros, sobrealimentado, de injeção direta, no qual se registam consumos de 367,68 g/kWh e 299,89 g/kWh para o biodiesel e gasóleo respetivamente, o que configura um aumento de 22,6%, não especificando no entanto qual o sistema de injeção utilizado, o que influencia o resultado obtido. Valores superiores são apresentados em [31], resultando do estudo descrito por este autor, realizado num motor de 4 cilindros, turbo, com injeção *common rail*, aumentos máximos no consumo específico de 34,4% (800 rpm) e 42,0% (1200 rpm) com o motor a 25% da carga máxima (gráfico da Figura 2.14).

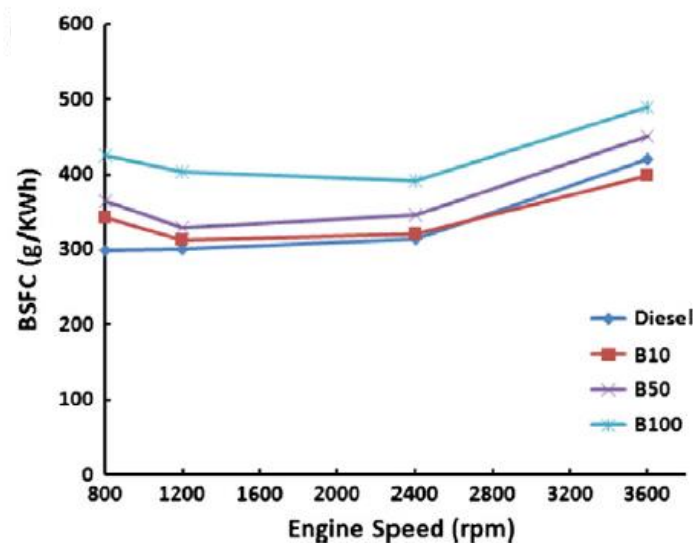


Figura 2.14 - Consumo específico de gasóleo, biodiesel e misturas, com o motor a 25% da carga. [31]

2.2.3.3 Rendimento Térmico do Motor

O rendimento térmico do motor é definido pela razão entre o trabalho produzido por este e a energia fornecida pelo combustível que utiliza, sendo esta última indicada pelo produto da massa de combustível injetado pelo seu PCI [26] [39].

Este parâmetro, traduzido matematicamente pela equação (2.3) [40], além do poder calorífico, acaba por ser mais apropriado para a comparação do desempenho de diferentes combustíveis do que o consumo específico [39], o que é o caso do presente trabalho.

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_e}{\dot{m}_f \times Q_{pi}} \quad (2.3)$$

A eficiência térmica pode ser entendida como uma indicação de como um motor utiliza o conteúdo energético da mistura no desenvolvimento da potência, ou seja, indica qual a percentagem de combustível que tem um papel ativo na combustão e na produção de potência [41].

Segundo [39] o rendimento térmico dos motores diesel não é afetado de forma significativa pela substituição do gasóleo pelo biodiesel ou pelas misturas de ambos, o que é consistente com as conclusões de [26] onde é referido que o rendimento térmico decorrente da utilização de biodiesel decresce ligeiramente, mostrando-se por vezes semelhante ao resultante da utilização do gasóleo. Variações no rendimento térmico entre 1 e 1,8% são mencionados na revisão efetuada por este autor [26], o qual apresenta ainda casos em que o rendimento térmico associado a utilização do biodiesel é inferior em 2,5% face ao uso do gasóleo. Exemplos de rendimentos térmicos de 24,4% e 25,7%, relativos à utilização de biodiesel e gasóleo respetivamente, são também referidos. Em consonância com estes valores estão também os resultados obtidos por [35] que refere terem sido obtidos rendimentos térmicos de 26,3% para o biodiesel e 27,8% para o gasóleo, medidos num motor de 4 cilindros, turbo, de injeção direta.

Contudo é também possível encontrar na literatura referências a rendimentos térmicos associados ao biodiesel superiores aos do gasóleo. Num estudo descrito em [31] conclui-se que a eficiência térmica resultante da utilização de biodiesel num motor de 4 cilindros, turbo, com injeção do tipo *common rail*, é superior à do gasóleo quando o motor funciona com cargas de 50% e 100%, o que se deve, segundo o autor, a uma melhor combustão resultante da presença de oxigénio no combustível, embora o contrário se tenha verificado com o motor a 25% da carga, o que o autor atribui a elevada viscosidade do biodiesel face à do gasóleo. Também [26] reporta casos em que o aumento no rendimento térmico do biodiesel é superior ao do gasóleo, num estudo realizado com um motor de 4 cilindros, aspirado, de injeção direta, no qual se registaram rendimentos de 37,2% relativos ao gasóleo, e 39,1% com o uso de biodiesel. Também neste caso o autor atribui esta tendência à melhor combustão do biodiesel, resultante do seu teor de oxigénio, e à sua melhor lubricidade.

Igualmente em [23], onde se documenta um teste realizado em estrada, o biodiesel apresenta um melhor rendimento térmico pois neste caso o consumo energético associado ao biodiesel foi 3,5% inferior ao do gasóleo.

2.2.4 Emissões Gasosas

A energia necessária para mover o automóvel é gerada através da queima de um combustível. A poluição produzida pelos automóveis é uma consequência do processo de combustão inerente ao uso de motores de combustão interna. Estes tipos de motores são os principais responsáveis pela poluição do ar, sendo os gases de escape um dos modos pelos quais estes motores emitem para a atmosfera elementos considerados poluentes [4].

A quantidade de compostos poluentes emitidos pelos escapes dos veículos depende do tipo de motor, do combustível utilizado mas também das condições de utilização. No caso de um motor Diesel os valores dos principais compostos poluentes produzidos são da ordem de grandeza referida na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 - Principais poluentes emitidos pelos veículos com motor diesel.
Reproduzido de [40]

CO	100 – 500 ppm	10 g/kg _{combustível}
NO _x	50 – 1000 ppm	15 g/kg _{combustível}
HC	400 ppm	3 g/kg _{combustível}

No entanto, à saída do motor estes gases passam por um catalisador onde são eliminados em grande parte, sendo por vezes reduzidos para duas ordens de grandeza mais baixo (1 a 2% do valor inicial). Além disso, este tipo de motores também produzem partículas sólidas (0.1 µm de diâmetro), produzindo fumo [4].

No caso do biodiesel, inúmeros estudos têm sido feitos no sentido de se investigar o efeito do biodiesel nas emissões de escape comparativamente ao gasóleo. Na sua maioria estes estudos indicam uma redução na emissão de hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e matéria particulada (PM), mostrando contudo um aumento nas emissões de óxido de nitrogénio (NO_x) [35]. A razão mais frequentemente atribuída a este aumento é o avanço na injeção que se verifica com o

biodiesel em resultado das suas propriedades físicas [39], o que se explicará melhor mais adiante. No caso das misturas de biodiesel com gasóleo, a redução destes valores, bem como o aumento de NO_x , é mais evidente à medida que o teor de biodiesel aumenta, podendo verificar-se no gráfico da Figura 2.15 que as maiores reduções se verificam com a utilização de biodiesel puro [8].

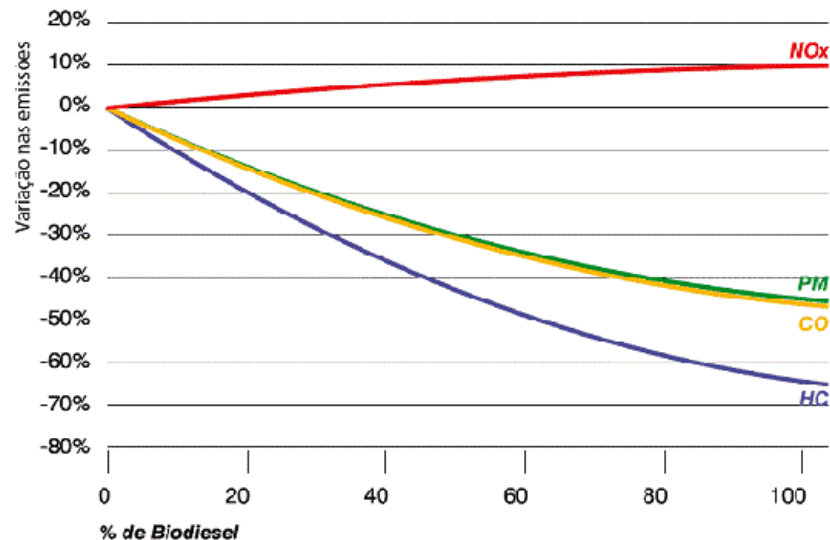


Figura 2.15 - Efeito do biodiesel sobre as emissões associadas ao biodiesel. [42].

2.2.4.1 Emissões Reguladas

De acordo com as mais recentes normas europeias (Euro V e Euro VI) relativas às emissões poluentes destinados a veículos ligeiros, nomeadamente no que diz respeito a veículos equipados com motor de ignição por compressão (CI), também designados por motores Diesel, são considerados os seguintes limites de emissão para cada categoria de emissões poluente da Tabela 2.13. No caso da substituição do gasóleo pelo biodiesel, como já se referiu acima, é bem evidente uma redução em todas as emissões reguladas, com exceção dos óxidos de azoto. Contudo, em determinados casos específicos, esta tendência poderá não ser tão óbvia, mercê de fatores tão diversos como diferenças nos sistemas de injeção, sistemas de escape, condições de teste, entre outros.

Uma análise mais detalhada de cada um dos poluentes é feita de seguida, sendo o comportamento típico de cada um comparado com alguns casos específicos, tendo em conta o tipo de motor em que os testes foram realizados, os quais se resumem na Tabela 2.14 com o propósito de simplificar a leitura.

Tabela 2.13 - Limites de emissões poluentes para veículos com motor diesel. [43].

EURO V*		
CO	500	mg/km
PM	5	mg/km
NO _x	180	mg/km
THC + NO _x	230	mg/km
*Regulamento (CE) 715/2007 de 20 de Junho de 2007		
EURO VI**		
CO	500	mg/km
PM	4,5	mg/km
NO _x	80	mg/km
THC + NO _x	170	mg/km
**Regulamento (UE) 459/2012 de 29 de Maio de 2012 (Altera o Regulamento (CE) 715/2007)		

Tabela 2.14 - Tipos de motor utilizados nos casos de estudo apresentados para a análise de emissões poluentes.

Caso	Equipamento utilizado	Ref.
1	Motor Diesel de 4 cilindros, turbo com <i>intercooler</i> , sistema de injeção <i>common rail</i> (1000 bar), sem modificações.	[44]
2	Motor Diesel de 4 cilindros, turbo, sistema de injeção <i>common rail</i> , compatível com as normas EURO IV.	[24]
3	Motor Diesel de 4 cilindros, turbo, sistema de injeção <i>common rail</i> , compatível com a norma EURO IV.	[31]
4	VW 1.9 TDi, sistema de escape com catalisador, compatível com a norma EURO II.	[45]
5	2 Veículos Ford Ranger 4x4: - Modelo de 2002: motor Diesel de 4 cilindros, turbo com <i>intercooler</i> , sistema de injeção injetor-bomba, compatível com a norma Euro II; - Modelo de 2010: motor Diesel de 4 cilindros, turbo com <i>intercooler</i> , sistema de injeção <i>common rail</i> , compatível com a norma Euro III.	[23]

Monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono é um gás tóxico, incolor e inodoro, sendo por isso difícil de identificar. Sobrevive na atmosfera durante cerca de um mês, sendo lenta e gradualmente oxidado para CO_2 . Atualmente o sistema de escape dos automóveis incorpora catalisadores capazes de eliminar cerca de 99% deste poluente venenoso. A produção do CO é controlada principalmente pela riqueza da mistura, em misturas ricas não havendo oxigénio suficiente para oxidar todos os átomos de carbono, dá-se a produção de CO . A temperatura tem também influência nas reações de oxidação pelo que se esta não for suficientemente elevada para manter a reação dada pela equação (2.4), o que acontece aquando da abertura da válvula de escape que origina um abaixamento súbito de pressão (induzindo uma diminuição da temperatura), dá-se a produção de CO [4].



No caso do biodiesel, além do seu teor de oxigénio, o seu IC é mais elevado do que o do gasóleo, sendo que a sua ignição ocorre mais facilmente, o que resulta numa melhor combustão com pressões e temperaturas mais elevadas, promovendo assim a redução das emissões de CO [40].

A conclusão de que as emissões de CO são reduzidas com a substituição do gasóleo por biodiesel, é comum à maioria da literatura [26], sendo que estas reduções, em média, se situam nos 50% relativamente às emissões registadas com gasóleo [39], embora outros autores mencionem reduções mais modestas, da ordem dos 27% em média [35], ou mesmo reduções de apenas 20% [28]. Diferenças nos ciclos de condução, no tipo de motor e condições de operação dos mesmos, têm efeito nas emissões de CO [26], o que poderá ser a explicação para os valores referidos pelos diferentes autores.

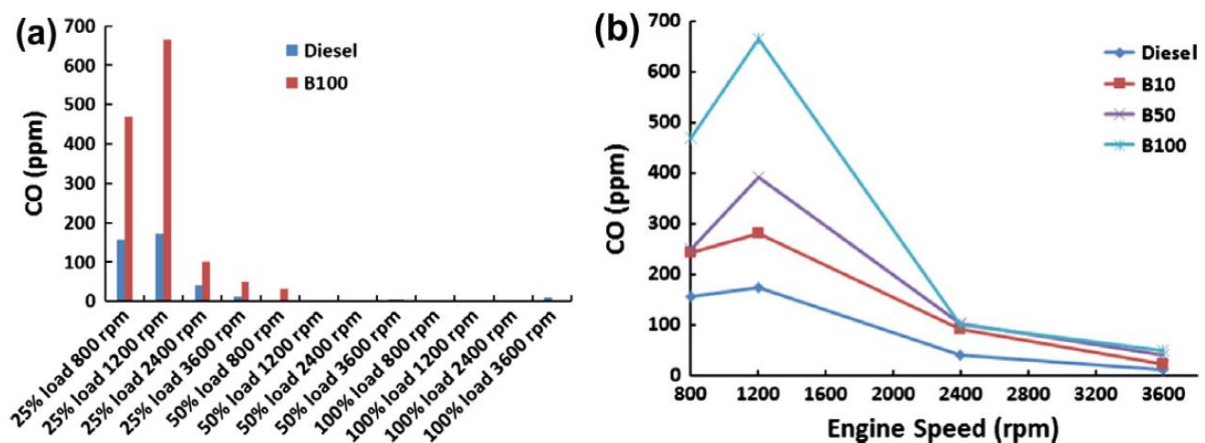
Ainda assim, dentro da gama dos valores atrás referidos, encontram-se os resultados mencionados em [44], onde foi utilizado um motor Diesel de 4 cilindros, sobrealimentado, com *intercooler* e sistema de injeção *common rail* (1000 bar), sem qualquer modificação (Caso 1). Os valores obtidos encontram-se compilados na Tabela 2.15. Apesar de, com a utilização de biodiesel, se verificar um aumento destas emissões com baixas cargas no motor, a sua redução é bem evidente para cargas elevadas.

Tabela 2.15 - Impacto das diferentes cargas do motor nas emissões de CO. Adaptado de [44]

Carga do motor	Impacto nas emissões de CO
10% (BMEP = 0,10 MPa)	+17,6%
25% (BMEP = 0,26 MPa)	+2,3%
50% (BMEP = 0,51 MPa)	-15%
75% (BMEP = 0,77 MPa)	-23%

Também em [24] se apresentam reduções nas emissões de CO, num estudo realizado num motor Diesel, sobrealimentado, com injeção do tipo *common rail*, compatível com os níveis de emissões impostos pela norma EURO IV (Caso 2). Neste caso registaram-se redução nas emissões de CO independentemente da velocidade e carga do motor. Por exemplo, como o motor a 2000 rpm e com uma carga de 12 bar BMEP registaram-se emissões de CO de 128 ppm para o gasóleo e 71 ppm para o biodiesel, o que configura uma redução de cerca de 55%.

Um motor semelhante (Caso 3) foi usado no estudo apresentado em [31]. Apesar de se terem registado uma diminuição acentuada nas emissões de CO, observadas com o motor a 50% e 100% da carga, o seu valor é sempre superior com a utilização de biodiesel (gráfico da Figura 2.16 b). Um significativo aumento foi registado com o motor a 25% da carga, principalmente a baixas velocidades (800 e 1200 rpm) conforma se pode ver no gráfico da Figura 2.16 a) e b). O autor atribui este aumento nas emissões de CO do biodiesel ao facto de a sua viscosidade ser superior à do gasóleo, o que afeta a atomização e a combustão, levando a um aumento destas emissões.


Figura 2.16 - Emissões de CO para o gasóleo e B100 a várias cargas (a) e para o gasóleo, B10, B50 e B100 a carga máxima (b). [31]

A mesma tendência de aumento nas emissões de CO pode verificar-se em [45], onde se utilizou um VW Golf 1.9 TDI, equipado com catalisador, compatível com o nível de emissões imposto pela norma EURO II (Caso 4), na simulação dos ciclos de condução NEDC e ARTEMIS. Neste caso, a utilização de biodiesel conduziu a um aumento das emissões de CO em todos os ciclos de condução NEDC que se verificou na ordem dos 95%. Quanto aos ciclos ARTEMIS as emissões de CO com biodiesel foram em todos os casos mais elevadas do que as verificadas com gasóleo, sendo que no caso do ciclo ARTEMIS urbano se verificaram 2,5 vezes mais elevadas. Relativamente à divergência dos resultados em relação à maioria da literatura, o autor refere serem inesperados, o que atribui ao facto de a gestão do motor e o sistema de tratamento de gases estarem otimizados para funcionamento com gasóleo. Refere ainda que os resultados obtidos nos ciclos de funcionamento a frio contribuíram também para a diferenciação dos resultados.

Óxidos de Azoto (NO_x)

Os óxidos de azoto são formados por reações entre o azoto e o oxigénio do ar em equilíbrio químico a altas temperaturas, ou seja, quanto mais quente for a combustão e quanto mais oxigénio houver, maior quantidade destes compostos será formada. No caso do biodiesel, a sua menor compressibilidade relativamente ao gasóleo permite que seja injetado mais rapidamente na câmara de combustão, o que se verifica especialmente em sistemas de injeção mais antigos, resultando num avanço da injeção que, associado à maior facilidade de ignição (dado o seu maior IC) origina uma elevação de pressão mais rápida, resultando em temperaturas de combustão mais elevadas e, por conseguinte, uma maior produção de NO_x [40]. Por ser sensível às temperaturas de combustão, a produção de NO_x aumenta com a velocidade e carga no motor [31]. Também o tipo de escape tem influência na produção de NO_x , onde o arrefecimento dos gases ocorre rapidamente, o que provoca a interrupção das reações que envolvem os NO_x , não se verificando a sua transformação inversa em N_2 e O_2 . Por esta razão os gases de escape apresentam assim concentrações de NO_x mais elevadas do que as correspondentes ao equilíbrio nessas condições de temperatura. Estes compostos são especialmente perigosos quando associados aos hidrocarbonetos não queimados (HC), sendo responsáveis pela produção do *smog* e pelas chuvas ácidas [40].

A maioria da literatura mostra que as emissões de NO_x resultantes da utilização do biodiesel aumentam ligeiramente, entre 10% e 15% segundo o referido em [28]. Porém outros autores, como por exemplo em [26], referem aumentos que variam entre 10% e 23%. Dentro desta ordem de valores

também em [39] são apresentados casos em que o aumento nas emissões de biodiesel se situam nos 16% e 20%.

Analisando os casos concretos já apresentados anteriormente, no Caso 1 [44] refere no seu estudo um aumento médio de 12.97% nestas emissões com a utilização de biodiesel relativamente ao gasóleo, sendo o valor máximo de 13.9% obtido com o motor a 75% da carga máxima. Também no Caso 2 [24] se verificou que os valores de NO_x obtidos com biodiesel são superiores aos obtidos com gasóleo, o que se tornou mais evidente com o aumento da carga no motor. Verificou-se neste estudo a influência da válvula EGR nestas emissões, o que ocorreu às 2000 rpm com o motor à carga máxima (12 bar BMEP), em que, devido à grande quantidade de biodiesel injetado necessário para obter a mesmo binário obtido com a utilização do gasóleo, levou a que a centralina (com a programação original) fechasse a válvula EGR o que, pelas razões já explicadas, levou ao registo de um pico nas emissões de NO_x , concretamente cerca de 5,9 g/kWh contra os cerca de 3,9 g/kWh obtidos com gasóleo nas mesmas condições, conforme se pode ver no gráfico da Figura 2.17.

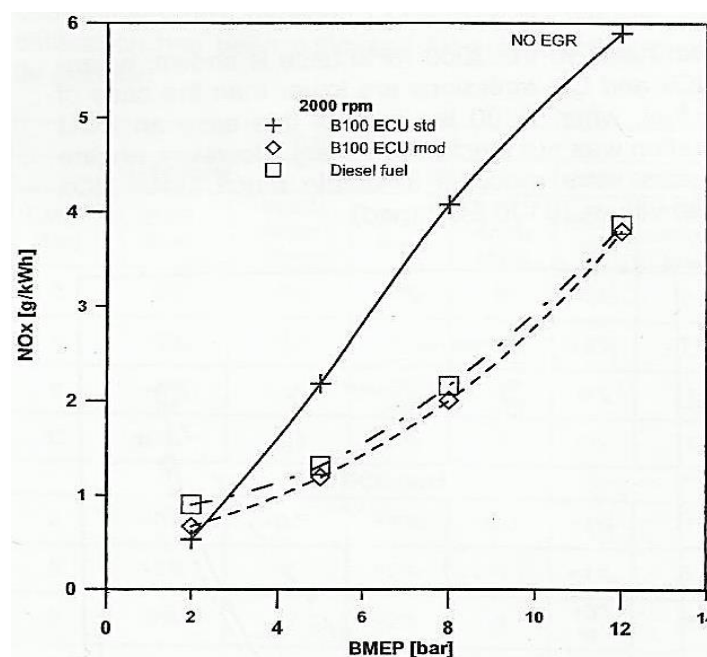


Figura 2.17 - Variação de NO_x com pressão média efectiva a 2000 rpm. [24]

No Caso 3 o estudo apresentado por [31], os valores das emissões de NO_x do biodiesel mostram-se inferiores aos do gasóleo na maioria das situações, verificando-se superiores apenas em situações de baixa velocidade e cargas médias ou elevadas, conforme se verifica na análise dos gráficos da

Figura 2.18. Situação que o autor apenas atribui à baixa velocidade do motor. Contudo, analisando os dados disponíveis em [31], poder-se-á explicar esta ocorrência pelo facto do motor (com injeção do tipo *common rail*), quando alimentado com biodiesel, apresentar um rendimento térmico inferior ao do gasóleo quando opera a 25% da carga.

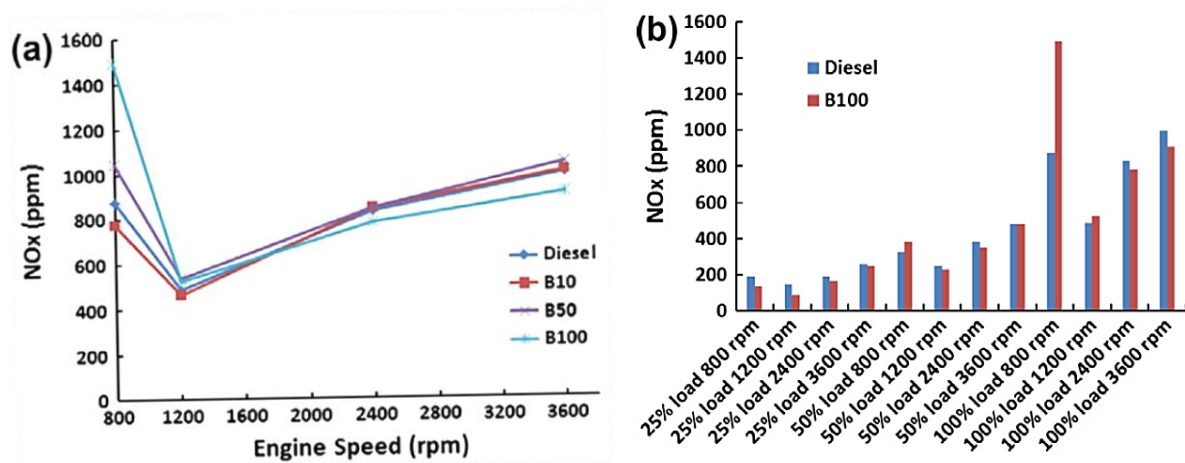


Figura 2.18 - Emissões de NO_x para o gasóleo, B10, B50 e B100 a carga máxima (a) e para o gasóleo e B100 a várias cargas (b). [31]

Emissões de NO_x, provenientes do uso de biodiesel, superiores em 6 a 9% relativamente ao gasóleo foram registadas em [45], com um VW 1.9 TDI, com injeção do tipo *common rail* (Caso 3), na simulação dos ciclos de condução, nas condições já anteriormente descritas. Contudo diferenças bastante mais significativas relativamente a estas emissões parecem ocorrer em motores mais antigos.

No estudo apresentado no Caso 5, realizado por [23] compararam-se dois veículos Ford Ranger, com motores semelhantes, embora com sistemas de injeção distintos: um modelo de 2002, equipado com bomba injetora, e outro de 2010 com injeção do tipo *common rail*, cujas emissões são compatíveis com as normas EURO II e EURO III, respetivamente. Neste estudo o aumento das emissões de NO_x resultante do uso de biodiesel foi bastante mais pronunciado no modelo de 2002, o qual com biodiesel emitiu mais 40% de NO_x relativamente ao teste efetuado com gasóleo, sendo que no caso do modelo de 2010 esta diferença foi bastante mais modesta, situando-se nos 8,4%. Neste caso o autor atribui estas diferenças ao facto da taxa de compressão ser mais elevada no motor mais antigo (19,5:1) do que no motor mais recente (17:1), o que se traduz em pressões e temperaturas mais elevadas, condições favoráveis a uma melhor combustão e consequentemente ao aumento dos NO_x.

Hidrocarbonetos não queimados (HC)

Também designados por Compostos Orgânicos Voláteis (VOC), os HC que aparecem nos gases de escape não são mais do que combustível que não foi queimado, ou que foi apenas queimado parcialmente. Este composto, quando associado aos NO_x, é responsável pela produção de ozono atmosférico (O₃), um dos principais responsáveis pelo *smog* fotoquímico.

Alguns dos hidrocarbonetos podem ser originados pelo óleo do motor, o que se poderá verificar principalmente em motores gastos, sendo outros resultado de fugas de pressão pela válvula de escape durante a compressão e explosão. Em particular nos motores Diesel, a principal fonte de HC é o combustível que fica retido no bico do injetor no final da injeção. Durante a expansão e escape os hidrocarbonetos são desalojados e misturados nos gases de escape. Outro processo de formação de HC ocorre na própria mistura, nomeadamente se existirem zonas de mistura muito rica no interior do *spray* e muito pobre no seu exterior, de tal forma que parte da mistura não seja queimada e apareça nos gases de escape, formando-se assim os HC.

A eliminação de parte dos HC produzidos ocorre durante a saída dos gases quentes pelo escape onde são oxidados, no entanto aqui a temperatura é muito mais baixa do que a que ocorre durante a combustão, pelo que a velocidade de reação é muito baixa. Quanto menor for a temperatura, menor será a taxa de reação e consequentemente maior quantidade de HC serão expulsos para a atmosfera [40].

O registo de menores emissões de HC decorrentes da substituição do gasóleo pelo biodiesel é comum na maioria da literatura [26]. Contudo é algo divergente o valor destas reduções apontadas pelos diversos autores. São referidos na revisão apresentada em [26] exemplos de emissões de HC provenientes do uso biodiesel inferiores em cerca de 35%, 45% e 67% quando comparadas com as emissões do gasóleo. Também em [39] são citados exemplos de emissões de HC 70% inferiores face à utilização de gasóleo. As diferenças nos resultados anunciados poderão, no entanto, resultar da utilização de diferentes tipos de motores, diferentes condições de teste ou diferentes métodos de medição.

Relativamente aos casos concretos já apresentados anteriormente, no Caso 1 [44] mostra que as emissões de HC diminuem com o aumento da carga do motor, sendo contudo sempre inferiores com a utilização de biodiesel, tendo registado menos 26,5%, 27,5%, 30,9% e 46,7% de emissões de HC do que com a utilização de gasóleo, consoante a carga do motor (10%, 25%, 50% e 75%, respetivamente). Embora nada seja referido pelo autor, dada a ordem de grandeza dos valores apresentados no gráfico

da Figura 2.19 e comparando os mesmos com os resultados do Caso 3 [31] em que se utiliza um motor semelhante, verifica-se que são muito superiores, o que poderá indicar que a medição foi feita a montante do catalisador. Também em [31] se registaram valores de HC bastante inferiores aos medidos com o uso de gasóleo, exceto para velocidades de 800 rpm e 1200 rpm com o motor a 25% da carga, em que os valores de HC relativos ao uso de biodiesel são superiores ao do gasóleo, conforme se vê no gráfico da Figura 2.20, embora o autor explique o resultado apenas como sendo influência da baixa velocidade e baixa carga do motor no processo de combustão, isto poderá indicar também que a atomização e a mistura do combustível não ocorre convenientemente, dada a superior viscosidade do biodiesel.

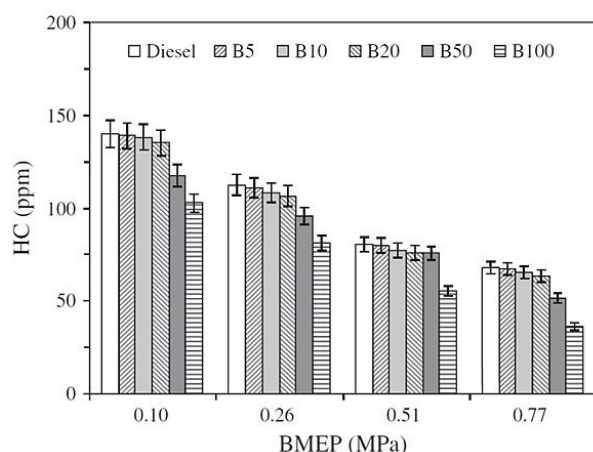


Figura 2.19 - Emissões de HC para várias misturas de biodiesel e gasóleo a várias cargas do motor. [44]

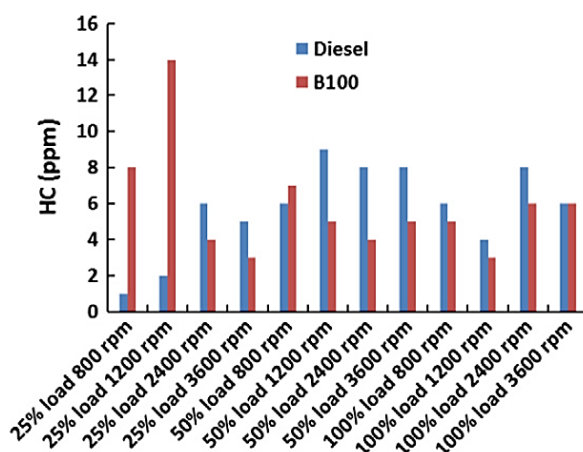


Figura 2.20 - Emissões de HC para gasóleo e B100 a várias cargas do motor. [31]

Na simulação dos ciclos de condução NEDC e ARTEMIS, no Caso 4 [45] documentam-se também aumentos nas emissões de HC com a utilização de biodiesel de cerca de 58% no ciclo NEDC, em particular no ciclo urbano efetuado a frio (UDC cold), tendo no entanto, com a utilização de biodiesel no ciclo ARTEMIS, registado uma redução de 20% nas emissões de HC face à utilização de gasóleo. No caso das superiores emissões do biodiesel, o autor atribui à degradação da eficiência do motor bem como do combustível nas condições de funcionamento impostas pelo ciclo UCD.

Partículas (PM)

As partículas são definidas como material sólido ou líquido em suspensão, as quais constituem o fumo dos gases de escape. Poderão resultar de combustível não queimado finamente pulverizado (fumo branco), de queima de óleo de lubrificação em resultado de danos ou desgaste no motor (fumo azul), ou resultante de injeção excessiva de combustível, insuficiente excesso de ar provocado por anomalias no sistema de injeção, ou pouca pressão do turbo (fumo cinzento/preto). Este último tipo de fumo é constituído por um substrato de fuligem (carbono) no qual estão dissolvidos hidrocarbonetos. Estes poluentes são característicos da combustão dos motores Diesel, e a sua dimensão varia entre os 0.02 e 0.12 μm [40].

Supõe-se que as partículas sejam formadas em regiões do *spray* onde não chega oxigénio suficiente para a sua oxidação antes da temperatura ter baixado durante a expansão. A pressão de injeção é assim um fator importante, pois quanto maior a pressão melhor será o processo de mistura pelo que esta resultará mais homogénea [40].

Quando o combustível é injetado na atmosfera quente do motor as ligações carbono-carbono dos hidrocarbonetos constituintes do gasóleo (HC de cadeias longas) são decompostos em HC's de baixa temperatura de ebulição (HC de cadeias curtas) e, de seguida, em cadeias fechadas de benzeno, o que acontece devido à perda de átomos de hidrogénio (desidrogenação), condensação polimérica e policristalização, sendo estas estruturas de carbono que formam o material particulado. Esta produção é tanto mais intensa quanto menor for a quantidade de oxigénio disponível, ou seja, quanto mais rica for a mistura mais partículas se formarão [40].

Por outro lado, as reações de oxidação aumentam com a temperatura, pelo que quanto maior for a temperatura de chama maior será a oxidação das partículas, contudo isto promoverá o aumento de emissões de NO_x , conforme já explicado anteriormente. Durante a combustão a quantidade de partículas formadas é muito maior do que as que se verificam no escape, sendo cerca de 95% queimadas durante a combustão e expansão ou mesmo na saída do escape, pelo que a sua medição deverá ser feita após a diluição no ar [40].

No caso do biodiesel as emissões de partículas são significativamente inferiores às do gasóleo. Uma das principais razões para tal é a presença de oxigénio na molécula que permite uma combustão mais completa, mesmo nas regiões da câmara de combustão em que a mistura é mais rica, promovendo também a oxidação de partículas entretanto formadas. O efeito do avanço da combustão tem aqui um papel importante uma vez que aumenta o tempo de permanência das partículas na

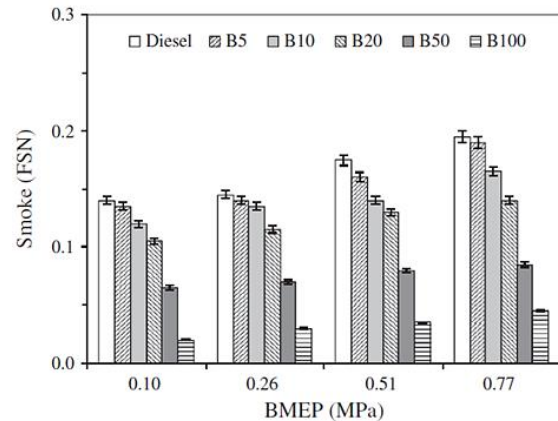
atmosfera a alta temperatura que, na presença de oxigénio, promove uma oxidação adicional. O teor muito baixo, ou mesmo ausência de enxofre e aromáticos são outra das razões, já que estes compostos são considerados precursores de partículas. O inferior ponto de ebulição do biodiesel reduz a probabilidade de formação de partículas ou alcatrão a partir de frações de HC's pesados que não conseguem evaporar [39].

A conclusão de que as emissões de partículas decorrentes da utilização do biodiesel em detrimento do gasóleo são significativamente menores é comum à maioria dos investigadores que estudaram as emissões destes combustíveis [26] [39]. Segundo o estimado pela EPA [46], quando comparadas com as emissões do gasóleo, as emissões de partículas do biodiesel são aproximadamente 50% menores, embora este valor resulte de um cálculo estatístico com um nível de confiança de 95% [39]. Todavia, esta estimativa deverá configurar um indicador geral uma vez que os valores das emissões variam bastante de autor para autor. Por exemplo, são referenciados em [26] um decréscimo médio de 22,5% na densidade de fumo de biodiesel quando comparado com o gasóleo, bem como emissões de partículas de biodiesel entre 53 a 69% inferiores às do gasóleo, sendo mesmo referenciado um caso em que a redução máxima foi de 86,9%. Embora o autor não o mencione, esta disparidade de valores poderá estar relacionada com diferentes motores utilizados pelos diversos autores por si citados, bem como diferentes condições de teste, métodos de medição, devido à utilização de biodiesel de diferentes origens ou ainda em misturas com gasóleo, pois também em [39] são citados diversos autores reportando diferentes resultados, sendo mencionado nesta publicação que a redução nas emissões de partículas devido ao uso de biodiesel não são significativas nos motores pesados, variando entre 20 a 40% nos motores ligeiros verificando-se, neste caso, que as maiores reduções se registaram em motores com sistema de injeção indireta. Contudo o autor cita também estudos em que as reduções nas emissões de partículas são acima dos 70% com biodiesel puro e acima de 45% com B20.

De acordo com esta tendência estão os resultados do Caso 1, já analisado relativamente às outras emissões, em que o autor [44] regista, com o uso de biodiesel, reduções médias na emissão de fumo de 80,5% em comparação com a utilização de gasóleo. Concretamente este autor registou a emissão de fumo a diferentes cargas do motor, sendo a redução (em percentagem) face à utilização de gasóleo resumida na Tabela 2.16.

Tabela 2.16 - Redução nas emissões de fumo a diferentes cargas do motor. [44]

Carga do motor	Redução nas emissões de fumo
10% (BMEP = 0,10 MPa)	-85,7%
25% (BMEP = 0,26 MPa)	-79,3%
50% (BMEP = 0,51 MPa)	-80,0%
75% (BMEP = 0,77 MPa)	-76,9%

**Figura 2.21** - Emissões de fumo do gasóleo e biodiesel a várias cargas do motor. [44]

Embora o autor não o refira, dados os valores de emissão de fumo apresentados (Figura 2.21), presume-se que o motor utilizado não possua filtro de partículas, ou possuindo, a medição terá sido feita a montante deste. No Caso 2 a medição de emissões de fumo não foram efetuadas, segundo o autor [24], devido ao seu nível ser extremamente baixo e o sistema de medição convencional não permitir uma medição confiável. Todavia neste caso o autor refere ter sido utilizado um motor compatível cujas emissões são compatíveis com a norma EURO IV, pelo que se pressupõe estar equipado com filtro de partículas, o que explica o nível extremamente baixo destas emissões. O mesmo sucede no Caso 3 em que o autor [31] não faz sequer referência à emissão de partículas, o que se deverá ao facto de neste estudo ter sido utilizado um motor semelhante e portanto, pelas mesmas razões, não se terem efetuado medições a este poluente.

Analisando o Caso 4, em que se simularam os ciclos de condução NEDC e ARTEMIS, verifica-se, contrariamente à tendência geral, um aumento nas emissões de partículas decorrentes da utilização de biodiesel. Conforme mostra a Figura 2.22, os níveis de emissões de partículas medidos no ciclo de condução NEDC com biodiesel foram superiores 177% às emissões do gasóleo. Contudo o aumento mais significativo foi registado no ciclo UDC a frio em que as emissões de partículas, decorrentes do uso de biodiesel, foram 278% superiores às do gasóleo. Todavia, apesar destes valores serem elevados continuam a estar abaixo do limite máximo imposto pela norma EURO II, com exceção do ciclo UDC a frio. Apesar de inesperados, o autor atribui estes resultados à alteração das propriedades físicas do biodiesel provocadas pelas baixas temperaturas no caso dos ciclos a frio, nomeadamente a alta viscosidade cinemática e baixo ponto de ebulição, as quais têm influência na atomização e evaporação tornando estes processos mais difíceis a baixas temperaturas. Além destas, outras causas são também apontadas, tais como o efeito do arranque a frio, a operação com o motor e o catalisador abaixo da

temperatura de funcionamento, e em última análise o facto de todo o sistema estar otimizado para o funcionamento com gasóleo.

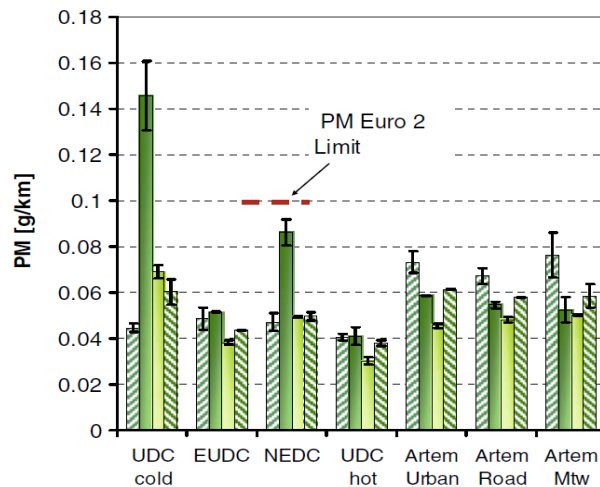


Figura 2.22 - Emissões de fumo na simulação de ciclos de condução NEDC e ARTEMIS [45].

No estudo a que se reporta o Caso 5 [23], conclui-se que a utilização de biodiesel em lugar do gasóleo resulta numa menor quantidade de fumo produzido. Os resultados de opacidade medidos no veículo mais recente (ver Tabela 2.14) mostram um valor inferior quando este foi alimentado com biodiesel. Resultado este que confirma a observação feita nos dois veículos utilizados neste estudo, ilustrada na Figura 2.23, que mostra uma menor quantidade de fumo produzido pelo veículo que utiliza biodiesel como combustível. Esta observação foi efetuada a elevada altitude e a baixas temperaturas, em que as viaturas seguiam em aceleração [23].



a)



b)

Figura 2.23 - Fumo produzido com a utilização de gasóleo **a)** e de biodiesel **b)** [23].

3 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

O objetivo inicial deste trabalho seria testar o funcionamento de um motor diesel, de 4 cilindros, quando alimentado com gasóleo e biocombustíveis (biodiesel e/ou outros), de modo a verificar as suas características em termos de potência, consumos e emissões gasosas. Pretendia-se que estes testes fossem realizados com um motor instalado em banco de ensaio, mas também num veículo, para realização de testes de estrada. Neste sentido iniciou-se a preparação do laboratório para receber um motor diesel de 4 cilindros. Contudo, apesar de se terem criado as condições para realização destes testes, as quais são a seguir documentadas, tal acabou por não ser possível devido a restrições orçamentais que inviabilizaram não só a aquisição de um motor diesel e respetiva eletrónica, bem como o aluguer do autódromo e do(s) veículo(s) necessários(s) para a realização dos testes de estrada.

Não obstante, numa tentativa de concretizar os objetivos inicialmente definidos, desenvolveram-se vários esforços no sentido de, pelo menos, adquirir a título de empréstimo, em colaboração com diversas empresas, um motor e respetiva eletrónica que cumprisse os requisitos necessários à realização deste trabalho. Realizaram-se assim diversos contactos ao longo de vários meses, os quais se revelaram infrutíferos, o que acabou por atrasar o início dos trabalhos práticos.

Num último esforço de dar andamento ao projeto inicialmente definido, utilizando ao um veículo *Peugeot*, modelo *406 Coupé 2.2HDI*, ilustrado na Figura 3.1, gentilmente cedido pelo Professor Doutor Jorge Martins, e recorrendo banco de ensaios existente nas instalações do ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto) (Figura 3.2), foi realizado um teste de potência, cujo resultado se apresenta no Anexo A. Todavia, devido a alguns problemas de funcionamento detetados no banco de ensaios utilizado, ao facto de serem necessárias alterações na viatura que implicariam a sua paragem por um período considerável, e por se tratar de uma viatura de utilização diária, esta ideia mostrou-se inviável tendo sido abandonada.



Figura 3.1 - Peugeot 406 Coupé 2.2HDI.



Figura 3.2 - Banco de ensaios do ISEP.

Na impossibilidade de se realizar o trabalho nos moldes inicialmente previstos, a única solução possível foi o recurso a um motor diesel monocilíndrico, melhor descrito mais adiante, já existente no laboratório. Apesar de se encontrar operacional, este motor requereu ainda assim bastante trabalho de preparação para nele se poderem realizar os ensaios pretendidos, uma vez que estava a ser utilizado para outro tipo de trabalho. Além disso o sistema de aquisição de dados existente revelou-se muito limitado, pelo que também este foi alvo de diversas intervenções tanto na parte mecânica como eletrónica, tendo neste último caso que se construir um novo sistema, o que aconteceu graças a colaboração do colega Armando Alves do Mestrado em Engenharia Mecatrónica que desenvolveu o seu trabalho de dissertação no Laboratório de Motores.

Nas secções seguintes são assim documentados os trabalhos de preparação do laboratório onde se incluem ainda diversas intervenções para reparação de material e equipamento necessário aos ensaios que se encontrava danificado ou se danificou devido a utilização. Os trabalhos preparatórios desenvolvidos apresentam-se assim divididos em 3 etapas principais:

- Preparação para motor de 4 cilindros;
- Preparação do motor monocilíndrico;
- Preparação do sistema de aquisição de dados.

3.1 PREPARAÇÃO PARA MOTOR DE 4 CILINDROS

Conforme já referido anteriormente, previa-se a utilização de um motor diesel de 4 cilindros, com injeção do tipo *common rail*, para realização de testes em banco de ensaio. No laboratório encontrava-se já instalado um banco de ensaio composto por um freio dinamométrico elétrico, do

tipo correntes de *Foucault* (Figura 3.3), ao qual se encontrava acoplado um motor a gasolina, de marca Opel (código de motor C20NE) proveniente do modelo Calibra do ano de 1990 (Figura 3.4), cujas características se encontram resumidas na Tabela 3.1 (lista completa no Anexo B), o qual foi aproveitado para testar o freio, uma vez que já se encontrava instalado na estrutura de suporte, enquanto se aguardava pela decisão de aquisição do já referido motor diesel. Todavia, nem o freio nem o motor a gasolina se encontravam operacionais pelo que foram necessárias algumas intervenções para os colocar em funcionamento.



Figura 3.3 - Freio dinamométrico elétrico do tipo de correntes de *Foucault*.



Figura 3.4 - Motor Opel C20NE.

Tabela 3.1 - Especificações técnicas do motor Opel C20NE. Adaptado de [47].

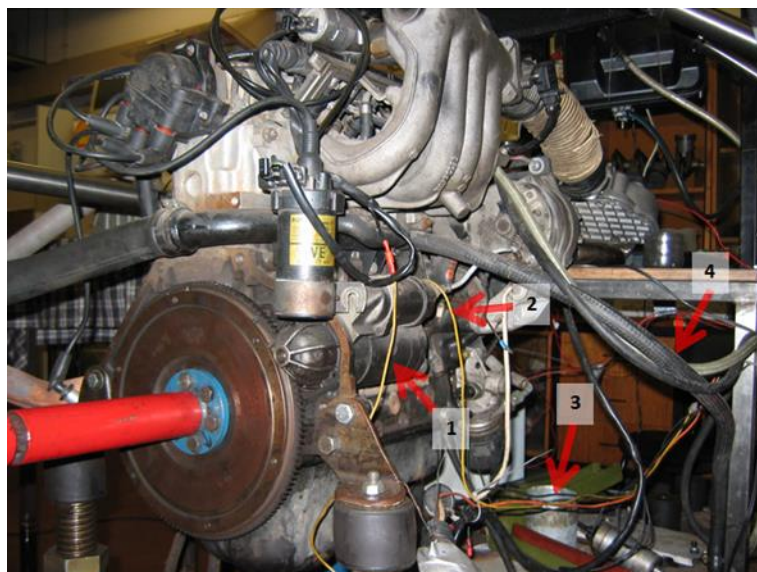
Fabricante	Opel/Vauxhall
Proveniência (Modelo)	Calibra 2.0 8V
Código do Motor	C20NE
Tipo	4 cilindros em linha
Cilindrada	1998 cm ³
Potência Máx.	85 kW (115 bhp) às 5200 rpm
Binário Máx.	170 Nm às 2600 rpm
Ordem de Ignição	1 – 3 – 4 – 2

No que concerne ao freio, a instalação do controlo ficou a cargo do Departamento de Eletrónica de Potência, não tendo no entanto ficado pronta em tempo útil, pelo que apesar de se ter testado parte do seu controlo, não foram realizados ensaios dignos de registo.

Quanto ao motor a gasolina, foi instalada toda a cablagem elétrica necessária ao controlo de arranque e paragem do motor, diversos componentes eletrónicos elementares (relés, sensores, manómetros, etc.), reparado o sistema de alimentação de combustível, instalada a linha de escape bem como reconfigurado o sistema de arrefecimento.

3.1.1 Instalação Elétrica

A instalação elétrica deste motor foi elaborada com base no diagrama do Anexo C [47], sendo que foram instalados os elementos necessários para o acionamento do motor de arranque, bobinas de ignição, bomba de combustível e monitorização da temperatura de água (Figura 3.5). Nesta instalação utilizaram-se fios elétricos e interruptores que se reaproveitaram de cablagens inutilizados de outras instalações existentes no laboratório, tendo os interruptores de acionamento e paragem do motor sido instalados na mesa de apoio ao controlo do motor (Figura 3.6 e Figura 3.7) na qual se integraram os manómetros de temperatura de água, pressão de óleo e controlo do acelerador.



- 1** – Cabo de alimentação da bobine de ignição.
- 2** – Cabo de alimentação do motor de arranque.
- 3** – Cabos de alimentação da bomba de combustível e interruptores de arranque.
- 4** – Tubos de combustível.

Figura 3.5 - Parte da instalação elétrica instalada no motor.



Figura 3.6 - Pormenor da bancada de controlo do motor.



Figura 3.7 - Mesa de apoio e controlo do motor.

Apesar do motor possuir a maioria dos sensores necessários ao seu funcionamento, foi necessário reparar algumas ligações do “chicote” elétrico e instalar alguns componentes que, por se encontrarem dispersos pelo laboratório, foi necessário confirmar a sua autenticidade e/ou compatibilidade com motor, o que se fez através da consulta ao *site* <http://www.bosch-automotive-pt.com>. Foram adquiridos novos sensores de posição da cambota (Figura 3.8) de temperatura de água, pois o primeiro não existia e o sensor de temperatura de água encontrava-se danificado (Figura 3.9). Os sensores adquiridos não são originais, dado o seu elevado preço, contudo a sua compatibilidade foi garantida pelos respetivos vendedores. Além destes foi ainda instalado o sensor de posição da borboleta do acelerador (Figura 3.10), sonda lambda (Figura 3.11), relé do sistema de injeção (Figura 3.12) e unidade eletrónica de controlo do motor (ECU), ilustrada na Figura 3.13.

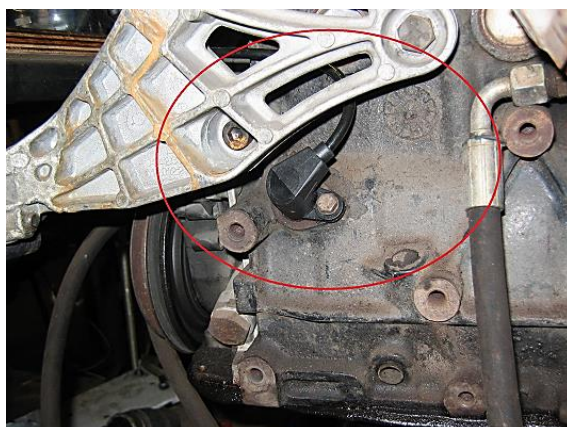


Figura 3.8 - Sensor de posição de cambota.

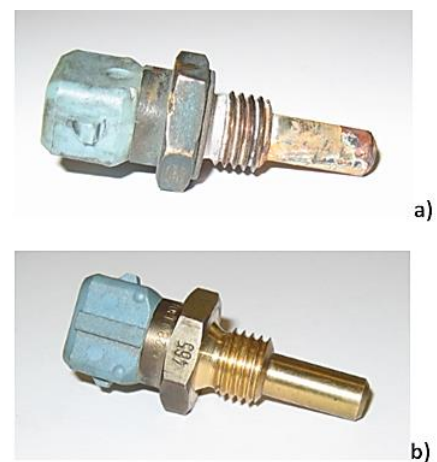


Figura 3.9 - Sensor de temperatura danificado **a)** e novo **b)**.



Figura 3.10 - Sensor de posição da borboleta do acelerador.



Figura 3.11 - Sonda Lambda.



Figura 3.12 - Relé do sistema de injeção.



Figura 3.13 - Unidade eletrônica de controle do motor.

3.1.2 Alimentação de Combustível

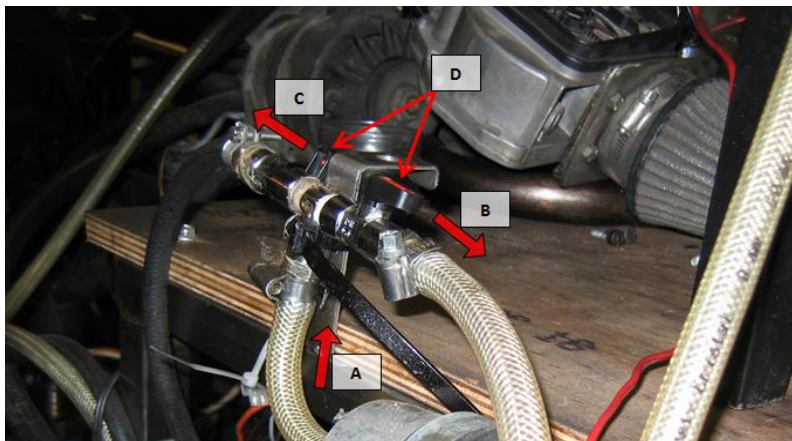
O sistema de alimentação de combustível para este motor era inexistente, pelo que houve necessidade de se construir um sistema que fosse suficientemente flexível para alimentar dois motores visto que decorriam trabalhos com um outro motor a gasolina, e existia apenas uma bomba de combustível operacional disponível (Figura 3.14). Para tal fez-se uma derivação no tubo de saída da bomba e uma união nos tubos de retorno dos diferentes motores de modo a convergirem ambos para um único reservatório de combustível. A derivação no tubo de alimentação foi elaborada com auxílio de duas torneiras, conforme a Figura 3.16, de modo a que fosse possível encaminhar o combustível para um ou outro motor consoante a necessidade, sendo que, dada a capacidade da bomba, não seria possível o funcionamento dos dois motores em simultâneo. As linhas de retorno de cada um dos motores foram conectadas a um único tubo de retorno ao depósito com ajuda de uma ligação “T”.



Figura 3.14 - bomba de combustível e respectivo elemento filtrante.



Figura 3.15 - bomba de combustível desmontada para limpeza.



- A** – Saída da bomba
- B** – Derivação para o motor 1
- C** – Derivação para o motor 2
- D** – Torneiras de controlo

Figura 3.16 - Sistema de torneiras para encaminhamento de combustível.

A bomba de combustível original do motor Opel encontrava-se inutilizada pelo que se recorreu a uma outra de características não muito diferentes, conforme consta da Tabela 3.2. Ainda assim esta última foi por diversas vezes alvo de intervenção, tendo sido desmontada para limpeza (Figura 3.15) dado ter ficado bloqueada várias vezes por detritos existentes na mangueira de alimentação de combustível, os quais, apesar de todos os cuidados na filtragem do fluido carburante, não foi possível remover.

Tabela 3.2 - Características das bombas de combustível utilizadas.

Bomba original Opel	Bomba de substituição
Marca: Bosch	Marca: Bosch
Ref.: 0 580 464 008	Ref.: 0 580 254 950
Pressão: 3 bar	Pressão: 4 bar
Caudal: 105 L/hora	Caudal: 95 L/hora

3.1.3 Sistema de Escape

A linha de escape foi instalada conectando-se a primeira secção original do motor à linha já existente montada no teto do laboratório, a qual incorporava já a panela central e silenciador (Figura 3.17 a) e b)). Todas as uniões foram seladas com pasta selante de escape e fita de alumínio de modo a eliminar fugas de gases para o interior do laboratório.



a)



b)

Figura 3.17 - Sistema de escape. Secção original (a) e ligação à panela central e silenciador (b).

3.1.4 Sistema de Arrefecimento

O sistema de arrefecimento do motor encontrava-se já parcialmente montado, sendo constituído por dois radiadores ligados em série. No entanto foi necessário substituir e alterar a

disposição de alguns dos tubos, substituir abraçadeiras que se encontravam danificadas, bem como instalar o reservatório de água (Figura 3.19) de modo a eliminar possíveis bolsas de ar existentes no sistema já que os radiadores se encontravam instalados em posição horizontal, de modo a poderem ser ventilados pelo sistema de extração existente (Figura 3.18). Dado que o sistema se encontrava instalado no interior do laboratório, e portanto, protegido de temperaturas negativas, foi utilizada apenas água destilada como fluido de arrefecimento.



Figura 3.18 - Radiadores instalados horizontalmente.



Figura 3.19 - Reservatório de água dos radiadores.

3.1.5 Teste ao Funcionamento do Motor

Instalados todos os componentes em falta e verificados os níveis de óleo e fluido de arrefecimento, foi efetuado o teste ao funcionamento do motor antes de este ser ligado mecanicamente ao freio dinamométrico. Verificaram-se desde logo problemas no arranque do motor pelo que foram desmontadas as velas de ignição, tendo sido efetuada uma limpeza às mesmas e verificados os contactos dos cabos. Foi, por diversas vezes, acionado o arranque do motor com as velas desmontadas de modo a poder verificar-se o seu funcionamento. Verificada a descarga dos eletrodos das velas estas foram recolocadas e devidamente conectadas aos respetivos cabos, tendo as ligações sido previamente limpas com *spray* limpa contactos, operação que se estendeu à caixa distribuidora.

Resolvido o mau funcionamento das velas de ignição foi efetuado o arranque do motor com sucesso, contudo o mesmo continuou a apresentar alguns problemas de funcionamento. Desde logo ralenti bastante irregular, aceleração pouco fluida, *raters* pela admissão (*backfire*), e elevado

consumo de combustível. Nesta fase foram sendo verificados diversos sensores, designadamente o sensor de temperatura, o qual não estava a fornecer uma leitura correta à ECU, tendo sido substituído conforme já referido no subcapítulo 3.1.1, e sensor MAF, tendo neste caso sido verificado o seu normal funcionamento.

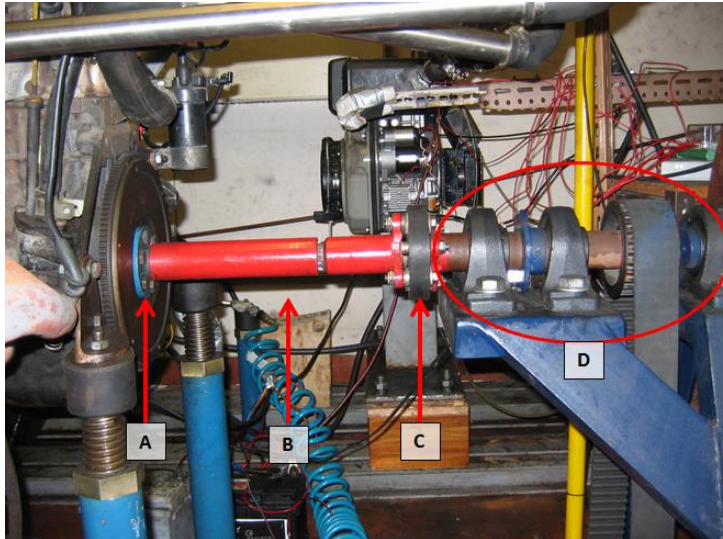
Efetuada uma análise ao sinal de saída da sonda *lambda* verificou-se que a mesma indicava uma tensão superior a 0,45 V, o que, de acordo com [48], indicava uma mistura demasiado rica. Verificado novamente o funcionamento das velas de ignição concluiu-se que estas, apesar aparentarem um normal funcionamento quando fora do motor, não estavam a funcionar convenientemente dentro do cilindro, pois pela verificação da temperatura de cada uma das condutas do coletor de escape verificou-se que dois dos quatro cilindros não estavam em funcionamento, pelo que se procedeu à substituição da velas de ignição.

Corrigido o funcionamento do motor, realizaram-se vários testes de rodagem com o mesmo desacoplado do freio, de modo a garantir o seu normal funcionamento, após o que se procedeu à montagem do veio e união flexível de ligação ao freio, repetindo-se os testes de modo a verificar a operacionalidade do sistema. Verificado o normal funcionamento do motor em *ralenti*, a várias velocidades de rotação, desacoplado e acoplado ao freio, deu-se por concluída a esta intervenção.

3.1.6 Freio Dinamométrico

Relativamente ao freio dinamométrico (Figura 3.3), conforme já foi anteriormente explicado, a instalação do seu controlo eletrónico ficou a cargo do Departamento de Eletrónica de Potência, não tendo no entanto ficado concluído em tempo útil. Não obstante, foi necessário proceder à sua ligação ao motor, instalar suportes para célula de carga e sensor de rotação bem como instalar uma barra para posterior calibração da célula de carga.

O conjunto de elementos de ligação era composto por um veio de transmissão ligado ao volante do motor por uma falange rígida e, na extremidade oposta, uma união flexível de borracha ligada ao mecanismo de transmissão do freio, conforme ilustra a Figura 3.20.



- A** – Falange de ligação ao volante
- B** – Veio de transmissão
- C** – União flexível.
- D** – Transmissão do dinamômetro

Figura 3.20 - Transmissão mecânica ao freio dinamométrico.

Para a montagem de uma célula de carga foi necessário construir uns apoios que permitissem um conveniente acoplamento à estrutura do freio, conforme mostra a Figura 3.21. A célula de carga instalada é da marca *Zemic*, modelo *BJG-C3-5000-6B*. Os apoios foram construídos a partir das extremidades de uma barra com perfil em “U”, tendo estas sido furadas para fixação da rótulas que suportam a célula conforme mostra a Figura 3.22.



Figura 3.21 - Localização da célula de carga.



Figura 3.22 - Posicionamento da célula de carga na estrutura do dinamômetro.

Foi também necessária a construção de uma barra de calibração para posterior medição do binário. Esta barra de calibração é constituída por um tubo de secção retangular soldado a uma placa de aço à qual foram soldados 4 parafusos (Figura 3.23) de modo a constituírem um encaixe

destinado à colocação no topo do dinamômetro, conforme se mostra na Figura 3.24. A barra tem um comprimento de 650 mm, tendo sido neste ponto aparafusado um gancho para posterior colocação dos pesos de calibração.



Figura 3.23 - Pormenor da base de fixação da barra de calibração.



Figura 3.24 - Localiação da barra de calibração.

O controlo de rotações do motor é feito por meio da medição da velocidade de rotação do dinamómetro. Para tal foi necessário instalar um suporte destinado a um sensor ótico. Assim foi necessário substituir um suporte já instalado, destinado a um sensor indutivo (Figura 3.25), por um outro onde o novo sensor pudesse ser instalado. Para tal aproveitou-se parte de um perfil de alumínio extrudido, tendo este sido furado à medida dos LED's infravermelhos, e fixado à estrutura do freio com auxílio de uma barra de perfil em "L" perfurada, conforme o apresentado na Figura 3.26.



Figura 3.25 - Sensor de rotações indutivo.

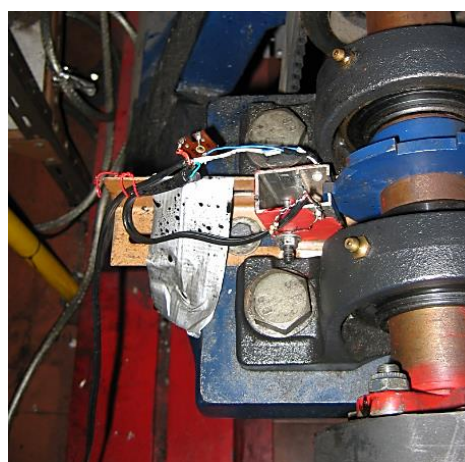


Figura 3.26 - Sensor de rotações ótico.

Com estas operações deu-se por terminada a intervenção nos componentes mecânicos do freio dinamométrico, ficando-se a aguardar a instalação do controlo deste que, conforme já referido, não aconteceu em tempo útil. Contudo o sistema ficou apto a receber o motor diesel, sendo necessária apenas a desmontagem do motor a gasolina, o que acabou por não acontecer pelos motivos já mencionados anteriormente.

3.2 PREPARAÇÃO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO

Pelos motivos já mencionados anteriormente, o motor utilizado nos testes aos biocombustíveis acabou por ser um motor industrial, monocilíndrico, da marca *Yanmar*, modelo *L100 V*, conforme ilustra a Figura 3.27, já existente no laboratório. As características técnicas deste motor encontram-se resumidas na Tabela 3.3, podendo consultar-se a ficha técnica completa no Anexo D.



Figura 3.27 - Motor Yanmar L100 V [49].

Tabela 3.3 - Especificações técnicas do motor Yanmar L100 V.
Adaptado de [49].

Fabricante	Yanmar
Modelo	L100 V
Tipo	Monocilíndrico, Vertical, Refrigerado a ar
Cilindrada	435 cm ³
Velocidade Nominal	3600 rpm
Potência	6,2 kW (8,3 hp)

Apesar deste motor se encontrar operacional, estava a ser utilizado na realização de outros trabalhos, pelo que foi necessário alguma intervenção, designadamente na recolocação de toda a linha de escape, reposicionamento na estrutura de suporte devido a alterações no sistema de medição de binário (ver secção seguinte), recolocação do sistema de admissão de ar original, instalação de alguns termopares para medição de temperaturas bem com instalação de um sistema de acelerador que permitisse, com algum rigor, a medição da sua posição.

3.2.1 Sistema de Escape

A linha de escape existente inicialmente estava configurada para outro tipo de trabalho, pelo que houve necessidade de a retirar e instalar outra mais adequada ao normal funcionamento do motor. Para tal foi utilizado parte de um tubo que incorporava já uma união flexível, contudo foi necessário instalar uma outra de modo não só a minimizar a vibrações provocadas pelo funcionamento motor, mas também a permitir a curvatura do tubo de modo a direccionar a saída para o sistema de extração do laboratório. As figuras abaixo mostram parte da ligação ao escape que existia inicialmente (Figura 3.28) e a instalação do novo tubo de escape (Figura 3.29).



Figura 3.28 - Parte do tubo de escape instalado inicialmente.



Figura 3.29 - Novo tubo de escape instalado e isolado termicamente.

A união flexível instalada está ilustrada na Figura 3.31, tendo na sua construção sido utilizados dois tubos de diferentes diâmetros (Figura 3.30) de modo a que esta pudesse ser encaixada no tubo da saída do motor e, na outra extremidade, na restante linha. Estes tubos foram soldados à união flexível, sendo o cordão de soldadura posteriormente isolado com fita de alumínio de modo a prevenir saída de gases causada por qualquer eventual falha na solda. Ainda na alinha de escape foi também instalado um tubo de diâmetro reduzido para recolha de gases para análise (Figura 3.32). Este tubo foi fixado à linha principal também através do processo de soldadura, sendo também isolado para impedir qualquer eventual fuga.



Figura 3.30 - Material usado na adaptação da união flexível.



Figura 3.31 - União flexível soldada e isolada.



Figura 3.32 - Tubo de recolha de gases para análise.

3.2.2 Medição de Temperaturas

A par da medição de outros parâmetros, foi necessário também medir a temperatura em alguns pontos do motor. Para tal foram utilizados termopares tipo “K” com bainha, semelhantes ao mostrado na Figura 3.33. O sistema de leitura e registo das temperaturas descrever-se-á melhor mais adiante, no capítulo 3.3.



Figura 3.33 - Termopar do tipo "K" de bainha metálica com bicone de vedação.

Uma das temperaturas que interessou medir foi a temperatura dos gases de escape. Para esta medição existia já um termopar semelhante ao da Figura 3.33 instalado no coletor de escape do motor, conforme se pode ver na Figura 3.34. Outro ponto de medição foi a culassa do motor. Neste caso foi instalado um termopar no exterior da culassa, tendo sido fixado com fita de alumínio e reforçado com arame de modo a impedir a sua deslocação com as vibrações do motor (Figura 3.35).

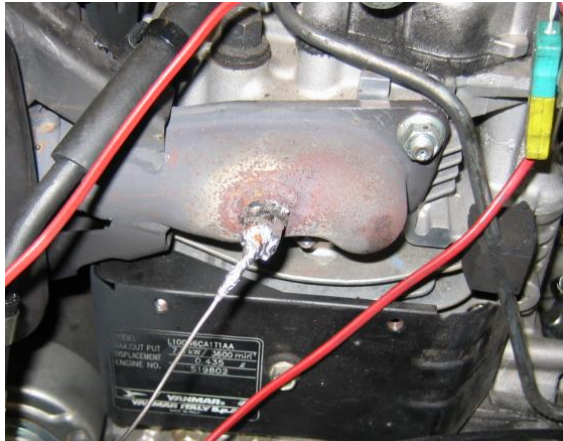


Figura 3.34 - Medição da temperatura dos gases de escape

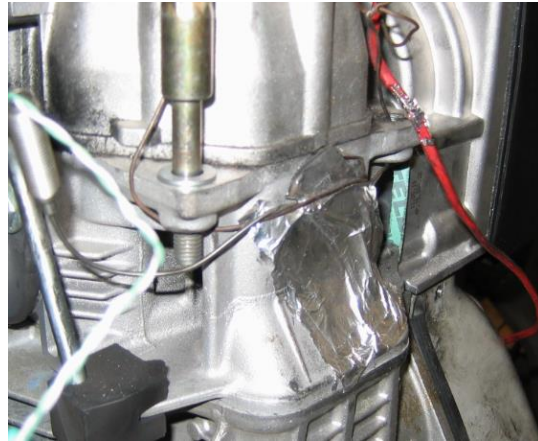


Figura 3.35 - Medição da temperatura da culassa.

O coletor de admissão do ar existente foi removido, tendo sido instalado o coletor original e respectivo filtro, sendo também instalado um termopar para leitura da temperatura do ar da admissão (Figura 3.36).



Figura 3.36 - Termopar para medição de temperatura do ar da admissão.

Para medição da temperatura do óleo foi instalado um termopar numa das tampas de verificação do nível, conforme se mostra na Figura 3.37. A tampa foi furada com uma broca de diâmetro igual ao do termopar de modo a garantir por um lado a sua fixação de modo a impedir o deslocamento para o interior do motor e ocorrência de dano, e por outro o contacto do termopar com o fluido lubrificante. Antes da colocação definitiva do termopar o furo foi preenchido com silicone de alta temperatura por forma a manter a estanquicidade da tampa. O termopar é assim colocado no motor integrado na tampa de verificação do nível de óleo, conforme o representado na Figura 3.38.



Figura 3.37 - Integração do termopar na tampa de verificação do nível de óleo.

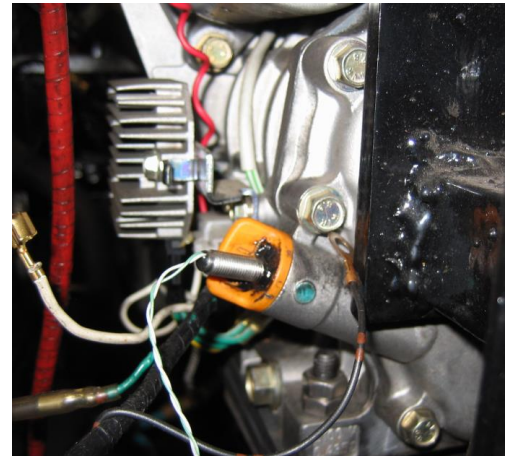


Figura 3.38 - Aspeto do termopar colocado no motor.

3.2.3 Controlo do Acelerador

Os testes a efetuar exigiam a determinação exata de várias posições do acelerador. Assim, houve necessidade de se instalar um sistema que permitisse colocar o acelerador numa determinada posição pré-definida sempre que tal fosse necessário. Procedeu-se então à instalação de um controlo por cabo, o qual liga o controlo da válvula a uma manivela, conforme ilustrado na Figura 3.39 e Figura 3.40 respetivamente.

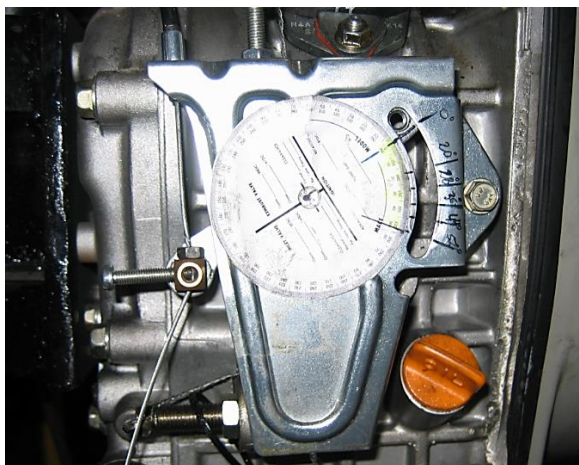


Figura 3.39 - Cabo de controlo da válvula do acelerador.

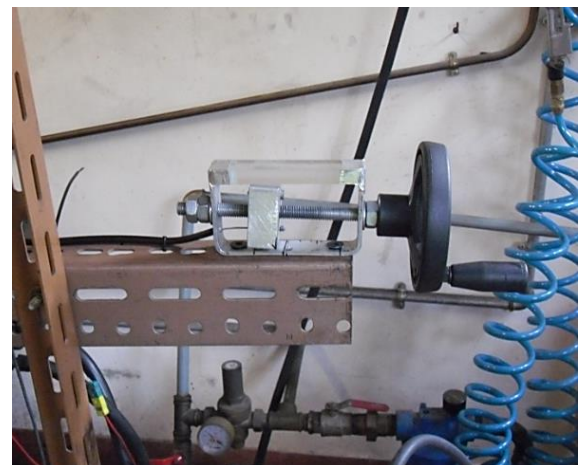


Figura 3.40 - Manivela de controlo da posição do acelerador.

Na determinação das diferentes posições foi utilizada uma circunferência graduada para determinação do ângulo de abertura da válvula do acelerador, tendo sido determinada a posição de referência do ralenti, ou seja, o ângulo de abertura mínimo necessário para que o motor funcionasse ao ralenti. Verificou-se também que o mecanismo da válvula do acelerador tinha uma amplitude máxima de 52° , e que a posição mínima para funcionamento ao ralenti ocorre a 20° , sendo o escalonamento das várias posições do acelerador feito de acordo com os valores mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Escalonamento das várias posições do acelerador.

Posição da válvula do acelerador	Funcionamento do motor
0°	Desligado
20°	Ralenti
28°	$\frac{1}{4}$ de carga
36°	$\frac{1}{2}$ de carga
44°	$\frac{3}{4}$ de carga
52°	Carga total

De modo a facilitar a colocação do acelerador numa mesma posição em diferentes testes, foram efetuadas marcações nas várias posições pré-definidas tanto no mecanismo da válvula do acelerador como na manivela de controlo, conforme ilustrado na Figura 3.41 e Figura 3.42. Embora a precisão do sistema na medição dos graus tenha um erro aparente de 2 a 3° (determinado apenas visualmente), a sua exatidão é aceitável, pois uma vez definida a posição de referência (20°) é possível colocar o controlo do acelerador numa mesma posição obtendo-se sensivelmente a mesma velocidade de rotação do motor, pelo que se considerou desprezível o erro associado.

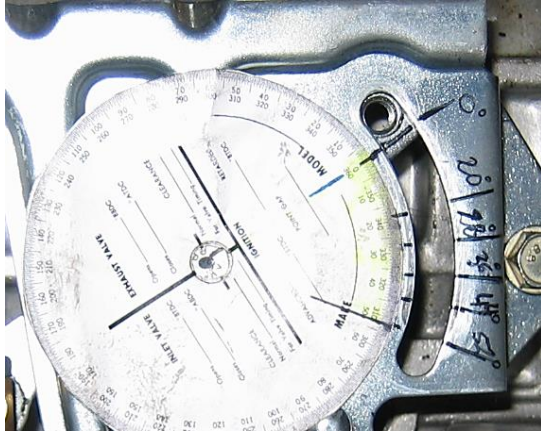


Figura 3.41 - Posições pré-definidas na válvula do acelerador.

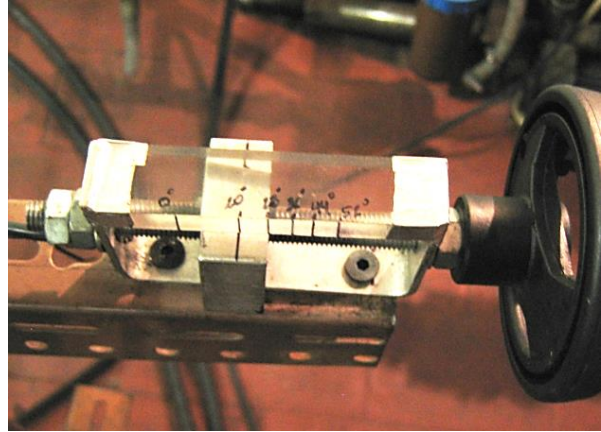


Figura 3.42 - Posições pré-definidas na manivela de controle.

3.2.4 Anomalias de Funcionamento

Na fase precedente à realização dos testes considerados válidos houve que verificar as condições de funcionamento do motor de modo a garantir que os resultados obtidos não eram influenciados por qualquer anomalia. Foram assim executados os procedimentos de verificação do nível de óleo, aperto dos apoios, sistema de alimentação, ligações elétricas e afinação do sistema de acelerador implementado de modo a garantir sempre a colocação nas mesmas posições pré-definidas.

Assim, sempre que o motor foi alimentado com gasóleo funcionou de modo normal, com várias cargas impostas pelo freio hidráulico (melhor descrito na subcapítulo seguinte), tanto em baixas como em altas rotações, verificando-se que conseguia atingir a sua velocidade máxima (3600 rpm) sem dificuldade.

Contudo durante a realização de alguns testes em que se utilizou biodiesel, verificou-se alguma oscilação na velocidade de rotação com o motor a carga total, a qual oscilava entre as 3200 e 3650 RPM aproximadamente. Não obstante os cuidados tidos na filtragem do combustível os sintomas sugeriam algum tipo de obstrução nas linhas de alimentação e retorno do combustível, pelo que houve necessidade de desmontagem das mesmas para limpeza, o que se fez com recurso a ar comprimido. Verificada a persistência do problema procedeu-se então à desmontagem do injetor e da linha de alta pressão, os quais se podem observar na Figura 3.43.



Figura 3.43 - Injetor e linha de alta pressão do motor Yanmar L100.

Não dispondo o laboratório de ferramentas adequadas à desmontagem e limpeza do injetor este foi apenas limpo exteriormente, tendo sido mergulhado em gasolina para dissolução dos resíduos carbonosos, identificados na Figura 3.44, e limpo com o auxílio de ar comprimido, processo que se repetiu com a linha de alta pressão. Antes da recolocação no motor o injetor foi mergulhado em gasóleo para lubrificação das paredes exteriores de modo a facilitar o seu encaixe no bloco do motor (Figura 3.45).



Figura 3.44 - Resíduo carbonoso no bico do injetor (assinalado).



Figura 3.45 - Encaixe do injetor.

Apesar das operações de limpeza descritas, e do bom efeito que as mesmas produziram em alguns casos, acabou por ser necessária a desmontagem da bomba de combustível (Figura 3.46 e Figura 3.47) para limpeza, pois conforme se explicará melhor mais adiante, na análise de resultados obtidos, verificou-se residir aqui a causa da oscilação da velocidade de rotação.



Figura 3.46 - Localização da bomba de combustível.



Figura 3.47 - Bomba de combustível.

Dada a sensibilidade deste componente, antes da sua desmontagem foi previamente consultado, no manual do motor [50], o seu esquema de montagem, o qual se reproduz no Anexo E. Extraído o componente do bloco do motor, procedeu-se à sua limpeza com ar comprimido, tendo o cuidado de antes se removerem as juntas de vedação e algumas peças mais pequenas (Figura 3.48), precavendo-se assim a ocorrência de algum tipo de dano.



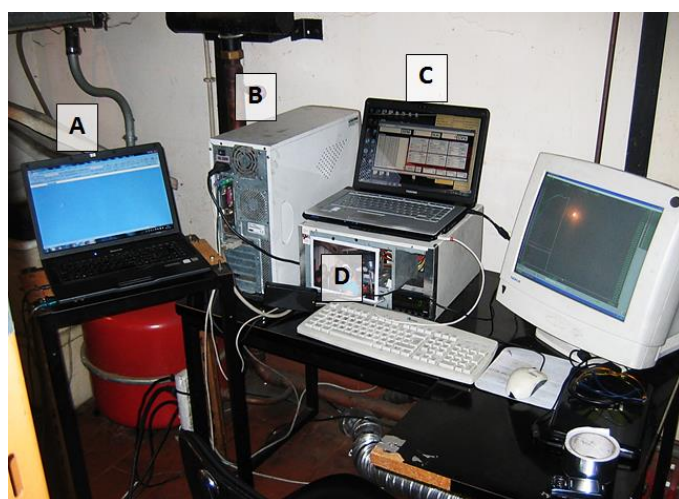
Figura 3.48 - Alguns componentes retirados da bomba de combustível.

Montados todos os componentes no motor, verificou-se a estabilidade da velocidade de rotação a carga total, pelo que, tendo em conta apenas esse aspeto, a intervenção revelou-se suficiente.

3.3 PREPARAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados adquiridos nos ensaios efetuados consistiram na medição e registo de vários parâmetros, tais como o binário do motor, a velocidade de rotação, medição de temperaturas, consumo de combustível e monitorização dos gases de escape. Estes dados permitiram à *posteriori* determinar outros parâmetros importantes, cujo método de cálculo se apresentará mais adiante no capítulo dedicado à análise de dados obtidos.

Na ausência de um sistema único que permitisse agregar todos estes dados foi necessário recorrer a diferentes sistemas, cada um com o seu *software* próprio, instalados em diferentes computadores, conforme se encontra descrito na Figura 3.49. Assim houve necessidade de se programar uma folha de cálculo de modo a facilitar o cruzamento e análise de todos os dados recolhidos. Nas secções seguintes apresentam-se com mais detalhe cada um desses sistemas, bem como os problemas verificados inerentes à sua utilização.



- A** – Registo da dados da balança.
- B** – Leitura e registo de temperaturas.
- C** – Leitura e registo de binário e velocidade de rotação.
- D** – Sistema de aquisição de dados do freio hidráulico.

Figura 3.49 - Conjunto de computadores usados na aquisição de dados.

3.3.1 Leitura e Registo de Temperaturas

No registo e leitura de temperaturas, foram utilizados termopares do tipo K, semelhantes ao que é mostrado na Figura 3.33, colocados estrategicamente em vários pontos do motor conforme o descrito na secção 3.2.2

Todos os termopares foram ligados um terminal *National Instruments TBX-68T* (Figura 3.50), o qual se encontrava conectada a uma placa de aquisição de dados da *National Instruments NI4350* como a que se mostra na Figura 3.51. As leituras e registo destes parâmetros foram efetuadas através do *software Virtual Bench Logger V2.5*, também da *National Instruments*, instalado no computador “B” indicado na Figura 3.49.

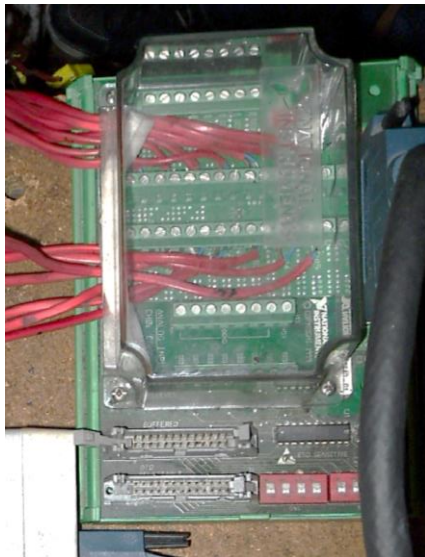


Figura 3.50 - Placa terminal *National Instruments TBX-68T*

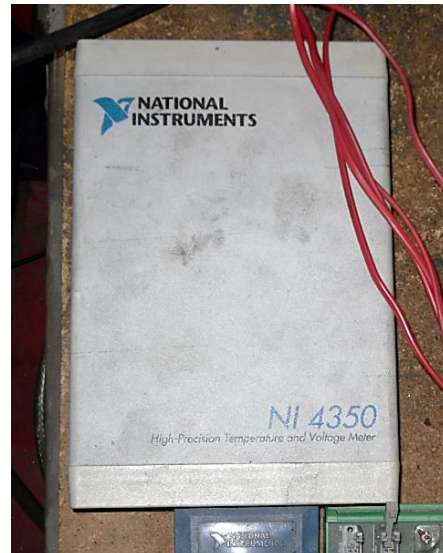


Figura 3.51 - Placa de aquisição *National Instruments NI4350*.

3.3.2 Pesagem de Combustível

Na falta de um equipamento mais adequado, foi utilizada uma balança de precisão para pesagem do combustível ao longo do tempo, sendo com base nestes dados que posteriormente se efetuou o cálculo do consumo específico.

Neste processo foi utilizada uma balança de precisão, de marca *KERN* modelo *FCB 12K0.1B*, como a que se mostra na Figura 3.52, com precisão de 0,1 g, à qual foi acoplado o sistema de suporte do reservatório de combustível, conforme ilustrado na Figura 3.53.



Figura 3.52 - Balança de precisão *KERN FCB-12K0.1B*.



Figura 3.53 - Sistema de pesagem de combustível.

A leitura e registo destes dados foram feitos através do *software KERN Balance Connection SCE V3.0*, instalado com computador “A”, conforme o indicado na Figura 3.49. Todavia verificaram-se aqui alguns problemas, tanto de fiabilidade do *software*, pois frequentemente causava a falência sistema operativo do computador, e da taxa de aquisição não ser constante, como de estabilidade da estrutura de suporte que era fortemente afetada pelas vibrações provocadas pelo funcionamento do motor, tendo este sido reposicionado nas calhas de suporte, de modo a minimizar este efeito.

3.3.3 Monitorização dos Gases de Escape

A medição de gases de escape foi, devido a restrições financeiras, realizada apenas num reduzido número de ensaios. Esta operação ficou a cargo de um técnico enviado pelo Centro de Valorização de Resíduos, a quem foi solicitada a análise.

Nesta operação foi utilizado um analisador da marca *TESTO*, modelo 350 XL, o qual se pode observar na Figura 3.54. A recolha da amostra foi feita diretamente no escape, através de um tupo colocado para o efeito (Figura 3.55), conforme já descrito na secção 3.2.1. Os resultados da análise foram recolhidos e tratados pela entidade referida, tendo sido fornecidos posteriormente em suporte digital. Os resultados desta análise serão comentados mais adiante, no capítulo dedicado à análise de resultados.



Figura 3.54 - Analisador de gases *TESCO 350XL*.



Figura 3.55 - Sonda de recolha de gases.

3.3.4 Medição de Binário e Velocidade de Rotação

Na medição do binário e velocidade de rotação do motor foi utilizado um freio hidráulico da marca *Go-Power Systems*, modelo *D-100 series*, apresentado na Figura 3.56, cujas especificações podem ser consultadas no Anexo F. Associado a este estava um sistema de aquisição de dados constituído por uma placa amplificadora *INA 125* (Figura 3.58), e uma placa de aquisição da marca *National Instruments NI USB-6008* (Figura 3.57), associados a um programa elaborado em *LabView*, através do qual era efetuada a leitura e registo dos provenientes da célula de carga e conta-rotações melhor identificados na Tabela 3.5.

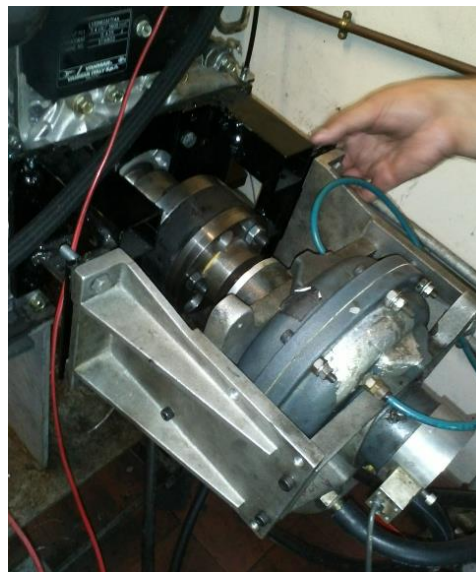


Figura 3.56 - Freio hidráulico D100 Series da Go Power Systems.



Figura 3.57 - Placa de aquisição NI USB-6008.

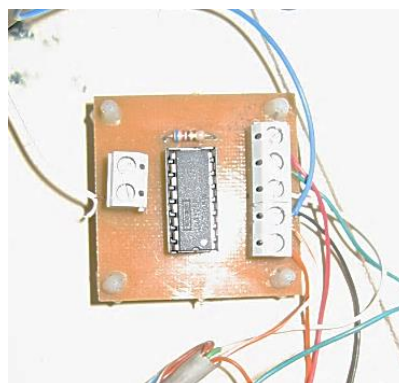


Figura 3.58 - Placa amplificadora INA 125.

Contudo, após a realização dos testes preliminares e análise dos primeiros dados verificou-se a existência de problemas neste sistema visto que alguns valores obtidos, mais concretamente os valores de binário, eram irrealistas pois além de apresentarem valores negativos (Gráfico 3.1) eram muito dispersos e nada tinham de semelhante com a curva original do motor (Gráfico 3.2), sugerindo uma taxa de aquisição muito baixa e a ocorrência de vibrações.

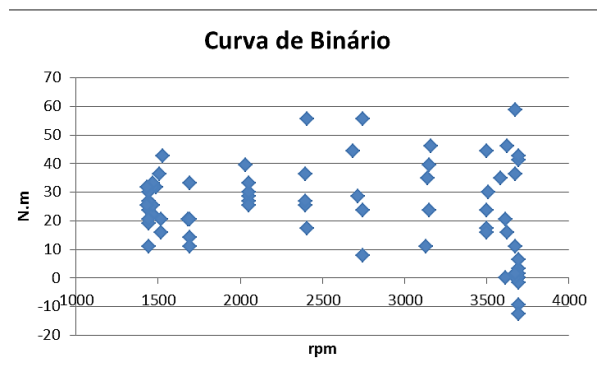


Gráfico 3.1 - Valores de binário obtidos com o sistema de aquisição de dados inicial.

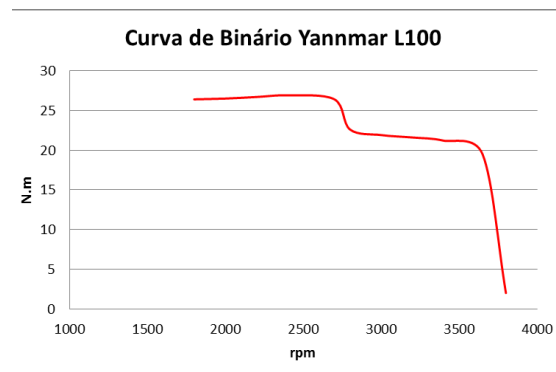


Gráfico 3.2 - Curva de binário original do motor Yanmar L100.

Uma primeira inspeção ao freio e estrutura de suporte mostrou que mecanicamente tudo se encontrava devidamente operacional, pelo que as atenções se voltaram para a parte eletrônica. Efetuadas algumas alterações a diversos parâmetros do *software*, em especial na taxa de aquisição, verificaram-se algumas melhorias contudo ainda bastante longe dos valores esperados.

Outro facto que se constatou foi que a placa de aquisição não era capaz de fazer uma média do sinal emitido pela célula de carga em função do tempo, registando apenas o valor instantâneo independentemente do tempo de funcionamento do motor, o que era agravado pelo facto do motor, pela sua natureza (sendo um monocilíndrico), apresentar muitas vibrações no seu funcionamento. Sendo grande a amplitude destas vibrações, o sistema era incapaz de diferenciar o binário produzido pelo motor da carga exercida na célula provocado por estas. Assim, de forma a perceber se o problema provinha do sistema de aquisição ou do sinal emitido pela própria célula, realizaram-se alguns testes nos quais, com recurso a um multímetro, se efetuou a leitura do sinal diretamente na saída desta. O recurso a este método foi fundamental para se perceber a ineficácia do sistema utilizado dada a aproximação dos valores obtidos à curva de binário original do motor, conforme se poderá ver pela análise do gráfico apresentado na Gráfico 3.3.

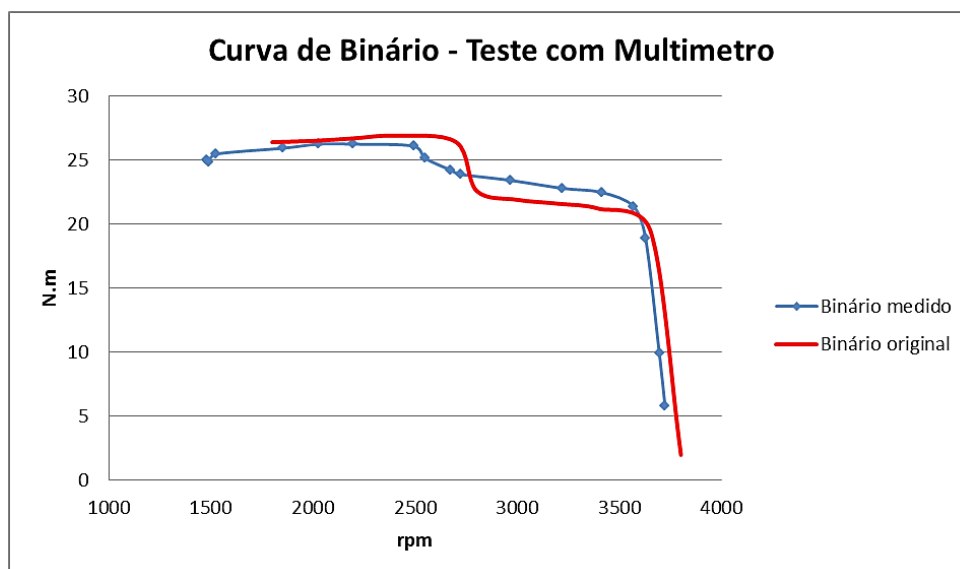


Gráfico 3.3 - Comparação do binário obtido por leitura com multímetro.

Identificados os problemas com o sistema de aquisição de dados existente, e mostrando-se inviável o recurso ao multímetro para a realização de todos os testes previstos, houve necessidade de se alterar por completo a sistema de aquisição inicial, tendo sido desenvolvido um novo sistema, o que apenas foi possível graças à colaboração do colega Armando Alves, aluno do Mestrado Integrado em Mecatrónica, que nas mesmas instalações desenvolvia os trabalhos relativos à sua tese de mestrado. O desenvolvimento deste novo sistema revestiu-se porém de

diversos problemas mecânicos, tanto no freio hidráulico como num dos motores utilizados, conforme se documenta de seguida.

Novo sistema de aquisição de dados

Não obstante os inúmeros problemas que se fizeram sentir, detalhados mais adiante, foi possível colocar em funcionamento o novo sistema de aquisição de dados, com a obtenção de resultados satisfatórios, os quais serão objeto de análise no capítulo seguinte.

Este sistema foi construído raiz, tendo sido aproveitados apenas alguns componentes do sistema já existente. A sua constituição é apresentada de forma resumida na Tabela 3.5, podendo encontrar-se uma descrição mais detalhada na dissertação do aluno do Mestrado em Engenharia Mecatrónica, Armando Alves que no DEM, desenvolveu os seus trabalhos práticos. Para a leitura e registo de dados, foi também desenvolvido um *software* específico em *Visual Basic*, designado de *Power Logger*, cuja taxa de aquisição é de 0,062 segundos.

Tabela 3.5 - Principais componentes do sistema de aquisição de dados.

Componente	Marca/Modelo
Conta-rotações	OMRON/ K3HB
Célula de carga	INTERFACE/ SSM-AJ-250 (resolução: 0,77 mV)
Placa de aquisição programável	ARDUINO/Mega 2560
Amplificador de instrumentação	INA 125
Circuito de condicionamento de sinal (Célula de carga e Conta-rotações)	-

O desenvolvimento deste sistema iniciou-se com a construção de um modelo protótipo (Figura 3.59), tendo este sido afinado com base na análise dos dados obtidos nos diversos testes que se foram realizando, os quais se comparavam com os dados fornecidos pelos fabricantes dos motores utilizados (BMW K75 e Yanmar). Desenvolvido o protótipo e construído o modelo funcional houve necessidade de se acondicionar todos os componentes elétricos e eletrónicos de modo a mais facilmente poderem ser manuseados (Figura 3.60). Assim, a partir de uma caixa de

computador vazia foram instalados todos os suportes necessários a cada um dos componentes, respectivas portas de ligação e alimentação elétrica, conforme se pode observar na Figura 3.61.

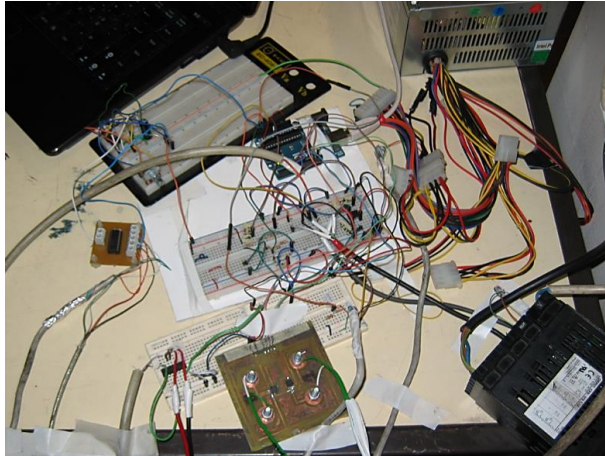


Figura 3.59 - Protótipo do sistema de aquisição de dados.

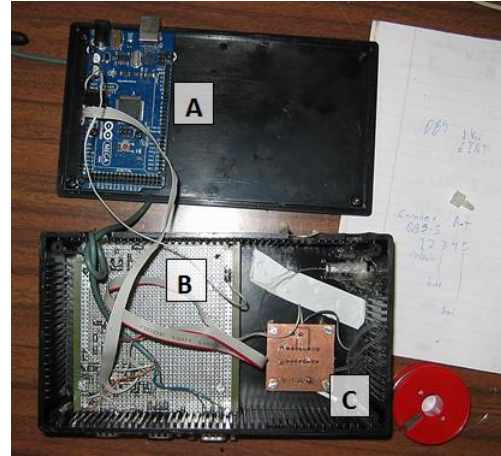
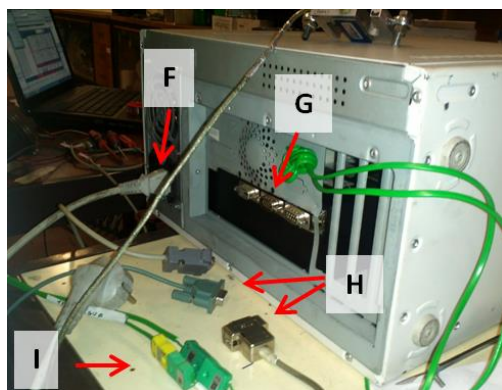
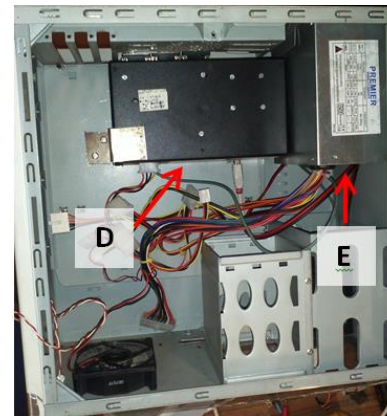
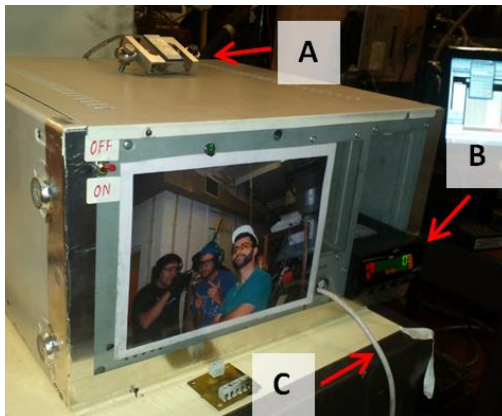


Figura 3.60 - Acondicionamento das placas de aquisição (A), de transmissão (B), e amplificador de instrumentação (C).



- A** – Célula de carga
- B** – Conta-rotações
- C** – Cabo de dados USB 2.0
- D** – Caixa de acondicionamento (Figura 3.60)
- E** – Fonte de alimentação 220V
- F** – Cabo de alimentação elétrico
- G** – Portas de entrada de sinal
- H** – Conectores da célula de carga e conta-rotações
- I** – Conectores dos termopares

Figura 3.61 - Caixa de acondicionamento do sistema de aquisição de dados

3.3.5 Problemas Mecânicos

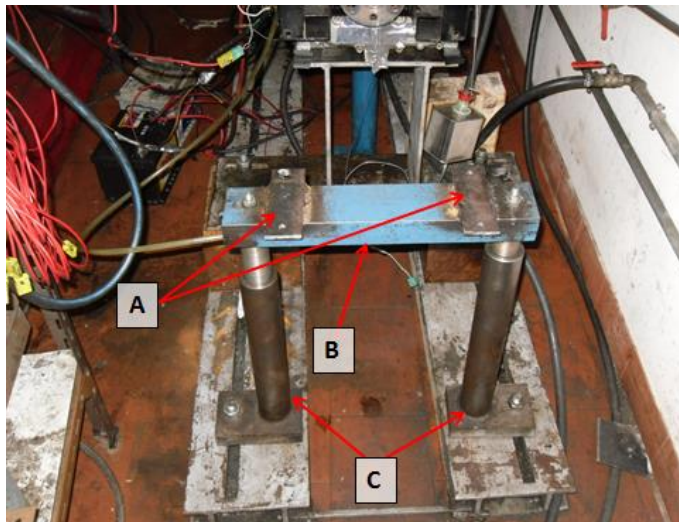
Como já se referiu, durante toda a fase de preparação do laboratório, e em particular durante a fase de desenvolvimento do sistema de aquisição de dados e fase de testes, a ocorrência de problemas mecânicos nos motores e no freio hidráulico foi uma constante. Houve assim necessidade de despende de muito tempo na reparação de avarias e recuperação de material cuja aquisição por vezes se mostrou inviável, em alguns casos pelo seu elevado custo, noutros por a sua disponibilidade nos distribuidores não ser imediata.

Uma das coisas que foi necessário fazer durante o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados foi verificar o comportamento do freio hidráulico em motores diferentes, uma vez que este equipamento era, à data de realização deste trabalho, único no laboratório e teria obrigatoriamente que ser partilhado na realização de outros trabalhos. Outro fator que obrigou a esta verificação foi, na fase de testes preliminares (documentada na secção 3.3.4), eliminar a possibilidade de algum problema mecânico no funcionamento do motor *Yanmar* ou no sistema de suporte do freio, estar a influenciar a leitura de dados. Para um melhor entendimento destes processos documentam-se de seguida os problemas verificados em 3 partes:

- Suporte do freio hidráulico
- Teste do freio no motor BMW K75
- Reparação do freio hidráulico

Suporte do freio hidráulico

Conforme se pode observar na Figura 3.56, o freio hidráulico era fixado a uma estrutura diretamente acoplada ao motor. Um das questões que importava esclarecer era a possibilidade das leituras da célula de carga estarem a ser influenciadas pela forte vibração do motor em funcionamento. Numa tentativa de minimizar este efeito procedeu-se à alteração do suporte do freio, tendo para tal sido construído um novo suporte cujo apoio fosse independente do motor. Deste modo, recorrendo uma vez mais a alguns despojos de material existe, utilizou-se uma barra de perfil em “U” com 5 mm de espessura, à qual foram soldadas transversalmente duas barras para suporte do freio, sendo o conjunto fixado por meio de ligações aparafusadas a dois suportes reguláveis, conforme ilustrado na Figura 3.62.



A – Barras transversais;

B – Barra de perfil em “U”;

C – Suportes reguláveis em altura.

Figura 3.62 - Sistema de suporte do freio hidráulico.

A montagem deste sistema implicou também a alteração do sistema de transmissão do motor ao freio. Neste caso foi utilizado um veio de transmissão existente, o qual não exigiu nenhuma alteração. O posicionamento do freio no novo suporte e respetivo veio de transmissão podem observar-se na Figura 3.63 e Figura 3.64, respetivamente.

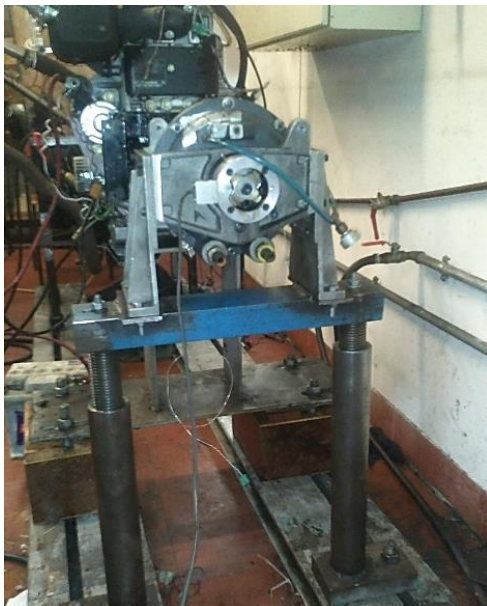


Figura 3.63 - Posicionamento do freio hidráulico no novo suporte.



Figura 3.64 - Veio de transmissão.

Teste do freio hidráulico no motor BMW K75

Conforme o já referido, o freio hidráulico era o único equipamento deste tipo operacional no laboratório e, pelos motivos já explicado anteriormente, foi necessária a sua instalação num outro motor. No caso, um motor BMW K75 (Figura 3.65), cujas características se encontram resumidas na Tabela 3.6.



Figura 3.65 - Motor BMW K75 na sua estrutura de suporte.

Tabela 3.6 - Características técnicas do motor BMW K75

Motor BMW K75	
Marca	BMW
Modelo	K75
Tipo	4 Tempos, 2 árvores de cames a cabeça, de injeção e ignição eletrónica
Nº Cilindros	3 em linha
Cilindrada	750 cm ³
Potência máxima	55 kW @ 8500 rpm
Binário máximo	68 N.m @ 6750 rpm

Ao longo desta fase a ocorrência de dificuldades foi uma constante, desde logo problemas eletrónicos que impediam o arranque do motor ou a sua paragem abrupta no decorrer dos testes ao freio. A solução destes problemas passou pela verificação de diversos componentes como foi o caso de diversos conectores, injetores, sensores, *encoder* de rotação, ligação das bobines de ignição, entre outros.



Figura 3.66 - Óleo vazado pelo motor.



Figura 3.67 - Desacoplamento do suporte do freio.

Um outro problema que obrigava frequentemente à interrupção dos testes foi o desgaste das juntas de vedação das tampas do motor que, devido à variação da temperatura, por vezes deixavam de cumprir a sua função, provocando fugas de óleo de volume considerável (Figura 3.66), obrigando a uma constante monitorização do nível de óleo. Problemas com a fixação do freio à estrutura do motor também ocorreram (Figura 3.67), o que obrigou à desmontagem de todos os elementos de ligação para verificação da sua integridade.

Reparação do freio hidráulico

Durante os trabalhos realizados o freio hidráulico utilizado foi também alvo de diversas intervenções. Embora este equipamento seja de construção relativamente simples, foram sempre tidas em consideração todas as indicações constantes do seu manual de operações [51]. Devido à utilização nos dois motores houve necessidade de se desmontar e montar este equipamento diversas vezes (Figura 3.68). Cada operação de transferência de motor obrigava também à alteração da sua estrutura de modo a encaixar num ou noutro suporte. Esta utilização intensiva acabou por provocar desgaste nos parafusos e roscas da estrutura de suporte (Figura 3.69) o que obrigou à sua substituição.



Figura 3.68 - Freio hidráulico desmontado.

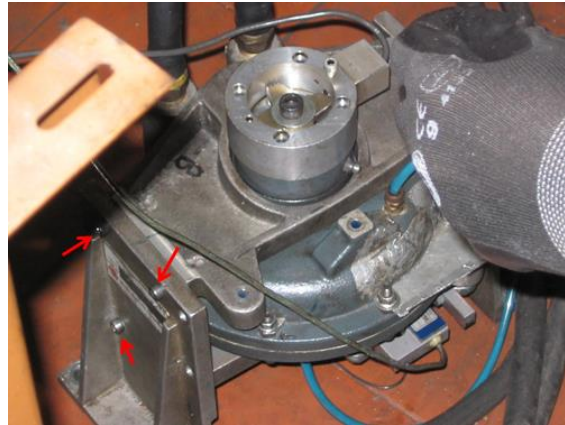


Figura 3.69 - Parafusos substituídos (assinalados).

Outro dos componentes do freio hidráulico que foi alvo de substituição foram os casquilhos dos pinos de pivotagem, identificados na

Figura 3.70. Os casquilhos originais apresentavam já algum desgaste, o qual foi sendo agravado pelo aumento das vibrações, tendo-se verificado que estas eram tanto maiores quanto maior a folga entre os casquilhos e os pinos. Dado que este problema inviabilizava por completo a continuidade dos trabalhos, e que a aquisição de peças de substituição se previa demorada, foi adotada uma solução de recurso que consistiu na maquinação de novos casquilhos.

Nesta operação foi utilizado um pequeno torno de bancada (Figura 3.71), no qual se maquinaram oito pares de casquilhos, como os que se mostram na Figura 3.72, cujas medidas de referência foram as dos casquilhos originais, já com bastante desgaste. Contudo houve o cuidado de corrigir essas medidas, por defeito no que diz respeito aos diâmetros interiores, e por excesso nos diâmetros exteriores. Não sendo conhecidas as medidas originais do casquilho em bom estado, era conseguida deste modo uma pequena margem para correção. Na falta de um material mais adequado foram utilizados tarugos de *teflon* na maquinação de quatro pares de casquilhos e *nylon* grafitado na maquinação dos restantes casquilhos (Figura 3.73).



Figura 3.70 - Localização de um dos pinos de pivotagem (A) e casquilho (B).

Apesar da substituição dos casquilhos solucionar no imediato o problema das vibrações, isto não impediu a sua substituição ao longo dos testes seguintes (Figura 3.74), o que se deveu à menor resistência dos materiais utilizados, pois entravam em ruína após a realização de alguns testes. Verificou-se no entanto que os casquilhos maquinados em *nylon* grafitado apresentavam uma resistência mais elevada, pois a sua durabilidade era maior.



Figura 3.71 - Maquinagem de um casquilho.

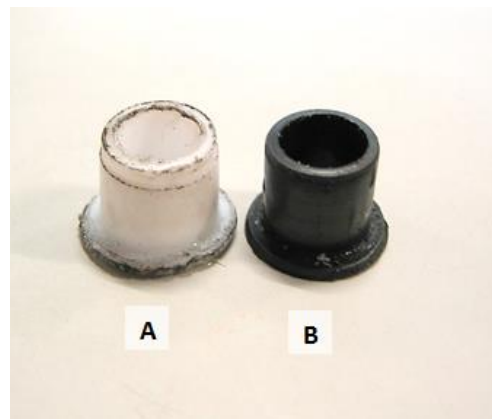


Figura 3.72 - Casquilho maquinado em *teflon* (A) e casquilho original (B).



Figura 3.73 - Casquilho original (assinalado) e casquilhos maquinados em nylon grafitado.



Figura 3.74 - Substituição de um dos casquilhos.

Uma das consequências das folgas nos casquilhos foram, como já se explicou o desacoplamento do suporte no motor BMW, como se mostra na Figura 3.67, devido a vibrações excessivas, contudo estas vibrações tiveram também consequência na fixação na célula de carga, concretamente nas rótulas (Figura 3.75) e parafusos de suporte (Figura 3.78). Dado não existir *stock* deste material no laboratório, e da sua disponibilidade não ser imediata no distribuidor, procedeu-se a uma tentativa de reparação das mesmas através do processo de soldagem (Figura 3.76). Porém esta tentativa não foi bem sucedida uma vez que o volume ocupado pelo cordão de solda era demasiado grande, não havendo atravancamento suficiente para a sua reutilização naquele componente, pelo mais tarde foram adquiridas rótulas novas. Como se pode observar na Figura 3.77 e Figura 3.78, os parafusos de fixação das rótulas foram também danificados, tendo sido substituídos por diversas vezes. Neste caso conseguiram-se recuperar do corpo do freio hidráulico todas as pontas partidas, embora por vezes com alguma dificuldade Figura 3.79.



Figura 3.75 - Rótula partida devido a vibrações.



Figura 3.76 - Tentativa de reparação por soldagem.



Figura 3.77 - Parafusos danificados por vibrações.

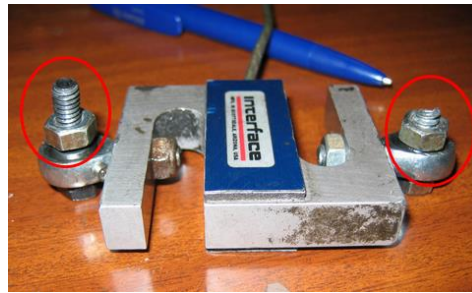


Figura 3.78 - Parafusos de fixação da célula de carga danificados (Assinalados).

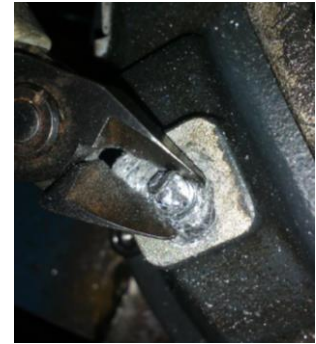


Figura 3.79 - Recuperação da ponta de um parafuso partido.

Uma outra consequência das vibrações foram os danos causados nas sedes dos pinos de pivotagem. Além das já referidas folgas nos casquilhos estas começaram a ser perceptíveis quando se verificou que, no decorrer de um dos testes realizados, os pinos de pivotagem se deslocaram (Figura 3.80) tendo “saltado” e deixado o freio sem um dos apoios. Após várias tentativas de recolocação destes componentes, e dada a impossibilidade de, em tempo útil, proceder à retificação dos pinos e das suas sedes, decidiu-se montar um barramento em cada pino de modo a impedir a sua deslocação. Os barramentos foram construídos a partir de chapas metálicas, sendo aparafusados à estrutura do freio hidráulico de modo semelhante ao que se pode observar na Figura 3.81.



Figura 3.80 - Deslocação de um dos pinos de pivotagem.

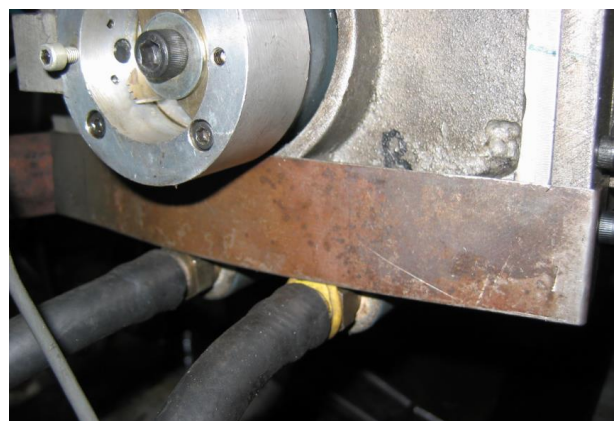


Figura 3.81 - Barramento de um dos pinos.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4. RESULTADOS OBTIDOS

Pretende-se neste capítulo expor e analisar os dados obtidos dos testes realizados. Estes, todavia, revelam-se bastante limitados face ao objetivo inicial do projeto, mercê não só das restrições já mencionadas, mas também consequência de todas as limitações e problemas experimentados ao longo dos trabalhos práticos. Perde-se assim o caráter inovador deste trabalho na medida em que não foi, de todo, possível estudar a influência da alteração dos parâmetros de injeção na potência e emissões poluentes, com a utilização de biodiesel como combustível.

No que concerne aos dados adquiridos, importa primeiramente perceber qual o método empregue na sua obtenção, que se faz de seguida, onde também se apresentam os métodos de cálculo relativos aos parâmetros cuja medição não foi possível efetuar.

4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Antes de mais importa salientar que todos os ensaios foram realizados com o motor no seu estado original, não tendo em nenhum momento sido realizado qualquer procedimento com o objetivo de alterar o caudal de combustível, a pressão de injeção ou qualquer outro parâmetro passível de modificar as suas especificações originais.

Tendo sido usado um freio hidráulico, houve o cuidado de verificar sempre que a pressão de água à entrada se encontrava a 3 bar. Todos os ensaios foram realizados com o motor à sua temperatura de funcionamento. Para tal, sempre que se justificou, foram seguidas as recomendações do fabricante, sendo o motor colocado em funcionamento à velocidade de *ralenti* (válvula do acelerador a 20°) durante aproximadamente 15 minutos. Foram realizados testes a diferentes cargas do motor, ou seja a diferentes posições do acelerador. Na definição destas posições foi utilizado o sistema já descrito na secção 3.2.3, estando as diferentes posições do acelerador enumeradas na Tabela 3.4.

Quanto aos combustíveis testados, o gasóleo utilizado foi adquirido numa estação de abastecimento local, da marca *Cepsa*. O biodiesel usado nos testes foi fornecido pela empresa *Ecomovimeto*, cumprindo as especificações impostas pela norma EN 14214. Foi também testada uma pequena amostra de bio-óleo, tendo neste caso sido utilizado um recipiente especialmente adaptado para o efeito (Figura 4.1), dada a sua reduzida quantidade (300 ml). Todavia não foi

possível recolher dados deste teste devido a alguns problemas que se verificaram com o sistema de aquisição de dados o qual, recorde-se, foi desenvolvido de raiz.



Figura 4.1 - Depósito para amostra do bio-óleo.

Sempre que se procedeu à troca de combustível as linhas de alimentação e retorno eram esvaziadas e, previamente à realização do ensaio, o motor era colocado em funcionamento com a válvula do acelerador posicionada a 28° , durante 5 minutos, de modo a ser consumido qualquer resto de combustível anterior.

4.1.1 Binário e Velocidade de Rotação

Na medição do binário e velocidade rotação foram utilizados os sistemas já descritos na secção 3.3.4 Estes parâmetros eram monitorizadas através do menu do programa *Power Logger*, apresentado na Figura 4.2, e o seu *output* automaticamente gerado num ficheiro de texto, tendo posteriormente que se proceder ao seu tratamento.

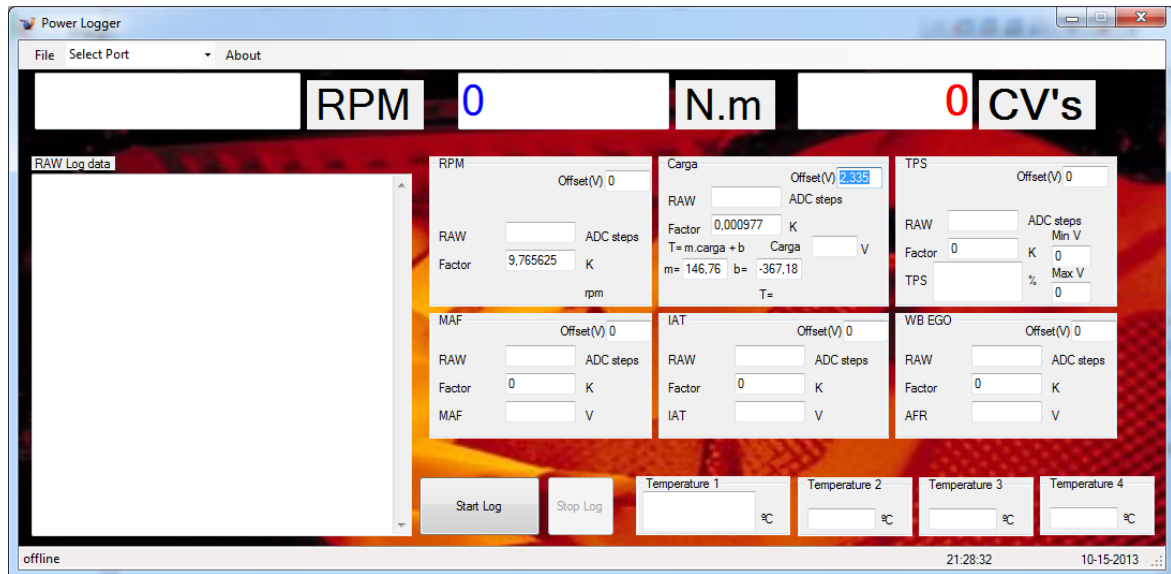


Figura 4.2 - Menu de apresentação do *software Power Logger*.

A velocidade de rotação era dada diretamente pelo conta-rotações *OMRON*, tendo a célula de carga sido previamente calibrada. Neste procedimento foi utilizada uma barra de calibração, de comprimento 350 mm, sendo colocados na sua extremidade um certo numero de pesos, tendo sido registado o valor de tensão correspondente a cada peso. Deste procedimento resultou a equação (4.1) que é a equação de calibração utilizada:

$$y = 146,76x - 367,18 \quad (4.1)$$

Onde:

y – Binário em N.m

x – Tensão de saída da célula em V

Todos os testes foram iniciados à velocidade de rotação máxima correspondente à posição de acelerador em utilização, sem qualquer carga imposta pelo freio hidráulico. Ao longo do teste era aberta gradualmente, até ao máximo, a válvula de regulação fina do controlo do freio hidráulico (Figura 4.3-A) de modo a aumentar progressivamente o seu binário resistente, tendo isto como efeito a diminuição da velocidade de rotação do motor. A abertura máxima da válvula de regulação fina mostrou-se suficiente, em todos os casos, para “travar” o motor até à sua velocidade mínima

(cerca de 1425 rpm). A válvula de controlo normal (Figura 4.3-B) era aberta somente após a abertura máxima da válvula de regulação fina, não tendo sido em nenhum dos casos registado qualquer efeito decorrente da utilização desta válvula nas condições descritas.

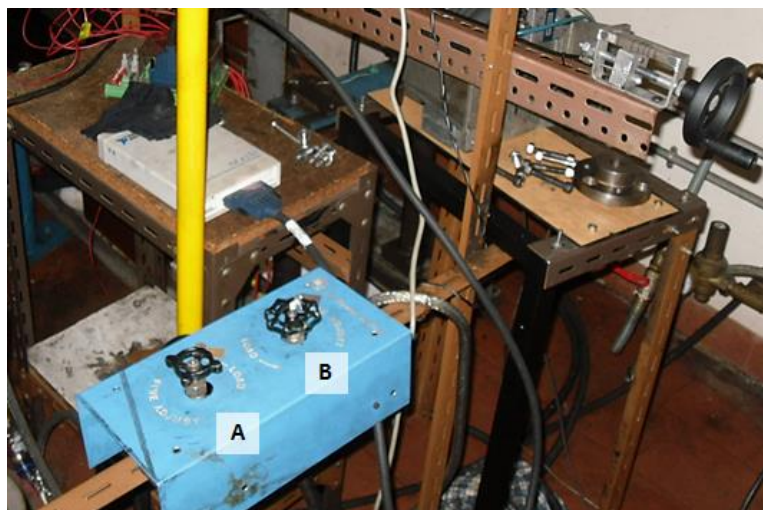


Figura 4.3 - Válvulas de controlo do freio hidráulico. Válvula de controlo fino (A) e de controlo normal (B).

4.1.2 Gases de Escape

A medição dos componentes dos gases de escape foi efetuada apenas numa das várias séries de testes válidos realizados, o que se deveu ao facto deste serviço ter sido requisitado ao Centro de Valorização de Resíduos. Tendo, portanto, sido um recurso muito limitado, não foi possível efetuar uma segunda medição para posterior comparação de resultados.

A medição das emissões gasosas decorreu em simultâneo com os testes destinados à determinação das curvas de potência e binário, tendo estes tido uma duração entre 12 a 14 min. Os valores de emissão de cada gás foram registados a cada 5 s. Sendo que os dados foram tratados pelo técnico que executou a medição, desconhece-se o procedimento de tratamento utilizado, tendo o seu registo sido posteriormente fornecido em folha de cálculo.

4.1.3 Consumo de Combustível

O cálculo do consumo de combustível baseou-se na pesagem de combustível gasto ao longo do tempo. A pesagem foi efetuada da forma já descrita na secção 3.3.2. Nesse caso a leitura era iniciada alguns instantes antes do início do teste, sendo depois utilizados somente os valores correspondentes à hora de início do teste. As leituras efetuadas pelo sistema eram automaticamente registadas numa folha de cálculo.

Um dos aspetos negativos do *software* utilizado era o facto de a sua taxa de aquisição não ser constante, oscilando entre 4 e 6 leituras por segundo. Outro problema que influenciou as leituras foram as vibrações que, apesar de minimizadas, faziam com que a leitura ao longo do tempo não fosse totalmente decrescente como seria de esperar, podendo a leitura seguinte ser maior, em algumas décimas de grama, do que a anterior.

De modo a contornar estes problemas eram eliminados os duplicados da hora registada (uma vez que a resolução do MS Excel é de apenas 1 segundo), sendo depois criado um gráfico com a variação da massa de combustível gasto ao longo do tempo. Através do gráfico era determinada uma linha de tendência da sua variação a que correspondia uma aproximação polinomial de 6º grau. A derivada desta equação seria depois utilizada no cálculo caudal para posterior determinação do consumo específico.

4.1.4 Tratamento de Dados

Como já foi referido, foram utilizados computadores e sistemas diferentes na medição dos diferentes parâmetros. Todos os sistemas geravam ou permitiam a conversão dos ficheiros gerados para *MS Excel*. Embora cada sistema tivesse a sua taxa de aquisição característica, era comum a todos a gravação do tempo aquando do registo de cada valor.

O cruzamento de dados teve sempre por base o sistema com maior taxa de aquisição, no caso o registo de binário e velocidade de rotação, cuja taxa de aquisição é de 0,062 s. A partir deste ficheiro, recorrendo à função “PROCV” do *MS Excel*, eram obtidos os registos correspondentes a determinado valor de tempo dos outros ficheiros.

A duração dos ensaios (12 a 14 min) e a taxa de aquisição de 0,062 s geravam uma grande quantidade de leituras nas quais se incluía algum ruído. De modo de modo a minimizar a

influência deste, foram feitas calculadas as médias por gama de rotação, com intervalo de 100 rpm. Estas médias foram calculadas para a velocidade de rotação e binário, sendo os restantes parâmetros determinados a partir deste valores.

4.1.5 Preparação das misturas

Além de se ter testado o motor com gasóleo e biodiesel, foram também testadas misturas destes combustíveis em várias percentagens, tendo sido preparadas 3 misturas diferentes, B25, B50 e B75.

A quantidade do combustível utilizado nas misturas foi medida com base no seu volume, tendo sido preparadas 3 amostras de 1000 ml cada, cujas percentagens se apresentam na Tabela 4.1. Para a medição das quantidades de combustível foi utilizado o goblé aferido, o qual se pode observar na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Goblé utilizado na preparação das amostras.

Tabela 4.1 - Misturas binárias de combustíveis.

Amostra	Quantidade de Gasóleo [mL]	Quantidade de Biodiesel [mL]	Volume total [mL]	Massa Volúmica [g/L]
B25	750	250	1000	856,075
B50	500	500	1000	866,75
B75	250	750	1000	876,625

4.2 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados que a seguir se apresentam foram obtidos de ensaios realizados com gasóleo, biodiesel, e misturas binárias B75, B50 e B25, à carga máxima do motor, com o acelerador posicionado a 52°.

Foram ainda realizados testes a várias cargas do motor utilizando apenas o gasóleo e B100 como combustível. As limitações já expostas anteriormente não permitiram, na realização destes testes, a utilização do sistema de aquisição de dados, tendo a sua medição sido feita por observação direta da variação dos valores de saída do conta-rotações e variação da tensão de célula de carga, o que se fez com o auxílio de um multímetro *Fluke 87*.

4.2.1 Curvas de Binário

Os curvas de binário apresentadas foram determinadas segundo o método já exposto na secção 4.1.1. Os dados que se apresentam nos gráficos seguintes (Gráfico 4.1 a Gráfico 4.5) referem-se a testes efetuados à carga máxima (posição do acelerador a 52°). Os valores a que se referem estes gráficos encontram-se compilados nas tabelas do Anexo G.

Numa primeira análise ao Gráfico 4.1 verifica-se que todos os combustíveis analisados produziram, de um modo geral, um binário inferior ao anunciado pelo fabricante. Este é um resultado esperado, desde logo pelo facto de se tratar de um motor já com bastantes horas de funcionamento, muitas delas em condições para as quais não foi projetado, designadamente no teste de diversos combustíveis que não o gasóleo, o que poderá traduzir o normal desgaste do motor decorrente da sua utilização. Outros fatores a considerar são também as condições de teste bem como o sistema de medição utilizado, certamente diferentes dos utilizados pelo fabricante.

Ainda no Gráfico 4.1 pode observar-se que sensivelmente acima das 2800 rpm, sensivelmente, à medida que o teor de biodiesel aumenta na mistura o binário produzido é menor, à exceção do B100 que apresenta maior binário do que o gasóleo, nesta faixa de velocidades. Na realização dos testes verificou-se que à medida que se aumentou a percentagem de biodiesel nas misturas, a velocidade máxima do motor baixou, além de se ter verificado alguma flutuabilidade na velocidade de rotação ao longo da realização dos testes, o que foi sendo mais notório para misturas com maior percentagem de biodiesel. Em parte este fenómeno poderá ser explicado pelo aumento de viscosidade do combustível, causando dificuldades na sua bombagem. Todavia, acima

deste ponto (2800 rpm aproximadamente), tal não se verificou com o B100, o qual apresenta maior binário e velocidade máxima mais elevada do que o gasóleo. Isto pode estar relacionado com o facto de se ter efetuado uma limpeza mais cuidada às linhas de combustível, uma vez que um dos testes com B100 não foi validado por o motor se apresentar bastante instável. Ainda assim foi observada alguma flutuabilidade com B100, porém bastante menor do que nos testes com as misturas. Por forma a despistar este problema foram realizados novos testes, porém os resultados obtidos apresentaram-se piores, surgindo gradualmente problemas mecânicos (já documentados anteriormente), não tendo sido possível solucionar o problema atempadamente. Alguma influência destes problemas poderá assim justificar alguma irregularidade apresentada pelas curvas.

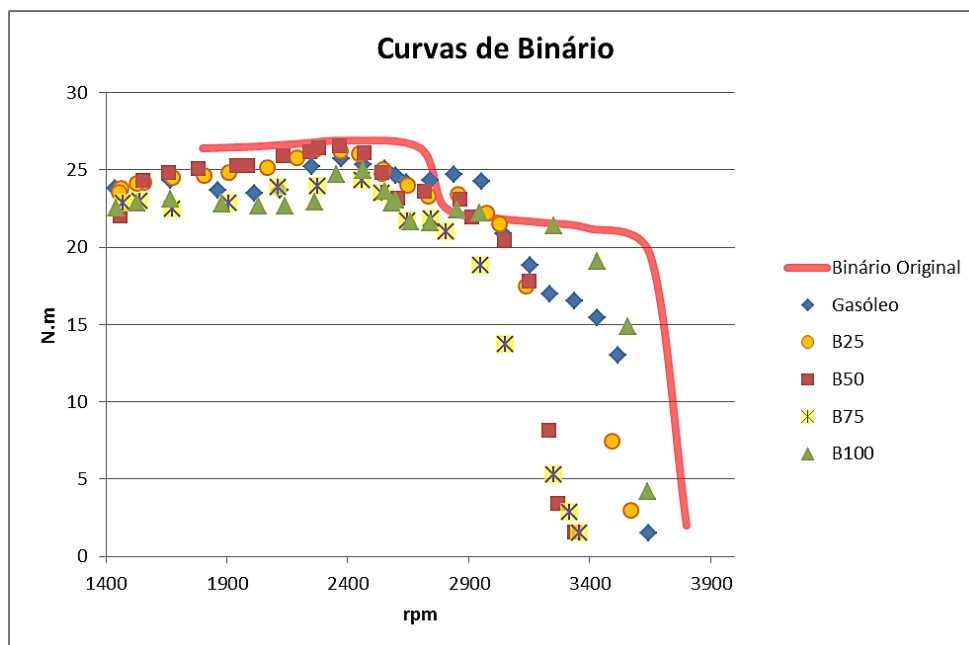


Gráfico 4.1 - Comparação das curvas de binário obtidas com a curva original do motor.

Apesar das irregularidades mencionadas atrás, o funcionamento do motor a velocidades abaixo das 2800 rpm mostrou-se bastante mais estável. Comparando todos os combustíveis testados abaixo desta velocidade verifica-se desde logo que, de um modo geral, as misturas B25 e B50 apresentam binários superiores ao gasóleo, principalmente abaixo das 2500 rpm, o que se pode observar com mais clareza no Gráfico 4.2 e Gráfico 4.3. Embora o comportamento de ambas seja bastante próximo, a mistura B50 apresenta um binário superior. Este comportamento poderá ser explicado pelo maior IC do biodiesel e o seu teor de oxigénio, os quais proporcionam uma

melhor queima do combustível, o que, associado a uma melhor lubricidade que o biodiesel induz na mistura, superam o efeito negativo da superior viscosidade destas quando comparadas com o gasóleo.

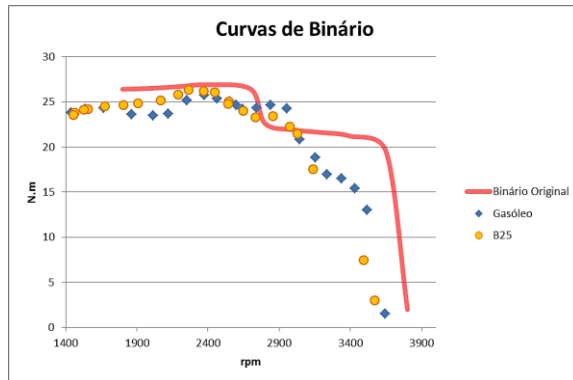


Gráfico 4.2 - Curvas de binário obtidas com gasóleo e B25.

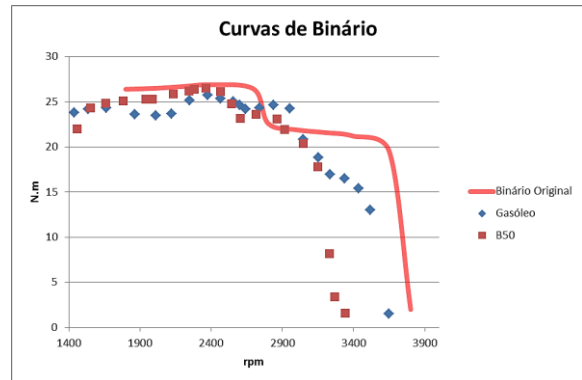


Gráfico 4.3 - Curvas de binário obtidas com gasóleo e B50.

Relativamente ao B75 e B100, como se pode ver no Gráfico 4.1, e com mais destaque no Gráfico 4.4 e Gráfico 4.5, estes apresentam um binário inferior ao gasóleo, sendo o binário produzido pelo B100, até às 2350 rpm (aproximadamente), inferior ao B75. Como já se referiu, há que ter em conta a eventual influência de problemas mecânicos nos resultados obtidos, dada a diferença entre as respetivas curvas principalmente acima das 2800 rpm.

Apesar do maior IC do biodiesel e seu teor de oxigénio proporcionarem uma melhor queima, a sua menor compressibilidade faz com que o avanço à injeção seja aumentado, pois trata-se de um motor com sistema de injeção composto por bomba, tubos e injetor. Este efeito é ainda potenciado pelo facto do IC do biodiesel proporcionar uma melhor inflamação. Tudo isto poderá provocar um aparecimento precoce do pico de pressão, o qual poderá ocorrer antes de PMS, “travando” assim a subida do pistão, produzindo menor binário face ao gasóleo.

Tendo em conta o comportamento das amostras até à 2800 rpm, os resultados mostram-se assim consistentes com o relatado na maioria da bibliografia consultada.

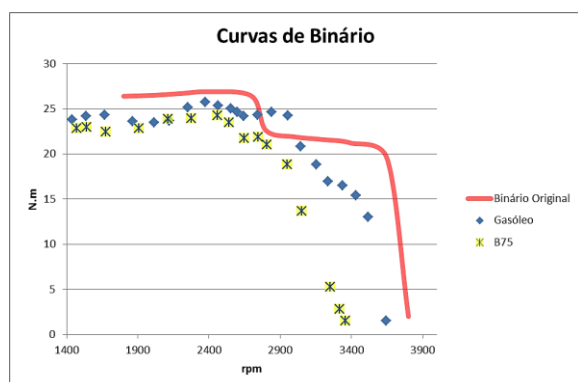


Gráfico 4.4 - Curvas de binário obtidas com gasóleo e B75.

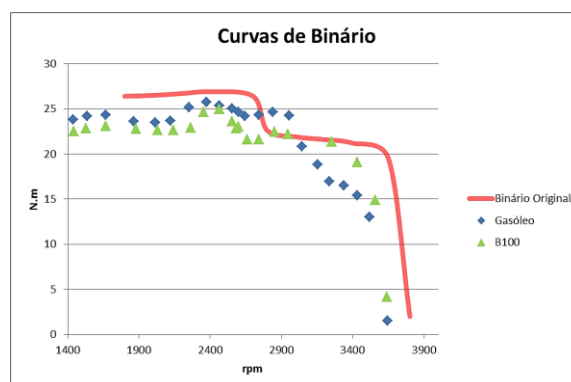


Gráfico 4.5 - Curvas de binário obtidas com gasóleo e B100.

Teste a Cargas Parciais

Conforme já referido, foram também efetuados testes a cargas parciais. Estes testes foram realizados a várias posições do acelerador, conforme o descrito na secção 3.2.3. Os gráficos seguintes traduzem os dados obtidos para o gasóleo (Gráfico 4.6) e para o biodiesel (Gráfico 4.7), encontrando-se os dados a que se referem compilados nas tabelas do Anexo H.

Os testes realizados à carga máxima confirmam de algum modo os resultados apresentados anteriormente, com exceção do B100 acima das 2500 rpm (Gráfico 4.8), que apresenta valores de binário inferiores ao gasóleo, o que poderá sugerir alguma influência dos problemas mecânicos nos resultados obtidos para o B100 acima desta fixa de velocidade nos testes apresentados inicialmente. Este é um dos pontos que interessará estudar melhor em trabalhos futuros.

Ainda da análise do Gráfico 4.6 e Gráfico 4.7, numa pequena faixa de funcionamento (sensivelmente entre as 1450 e 1800 rpm), o binário obtido a $\frac{3}{4}$ da carga é superior ao obtido na mesma faixa de funcionamento à carga máxima, o que se verifica para ambos os combustíveis, sendo porém que neste ponto o biodiesel produz ligeiramente menos binário. Sendo que isto acontece para ambos os combustíveis, tendo em conta o perfil das restantes curvas obtidas, poderá concluir-se que neste ponto as condições de funcionamento serão mais favoráveis do que a carga total.

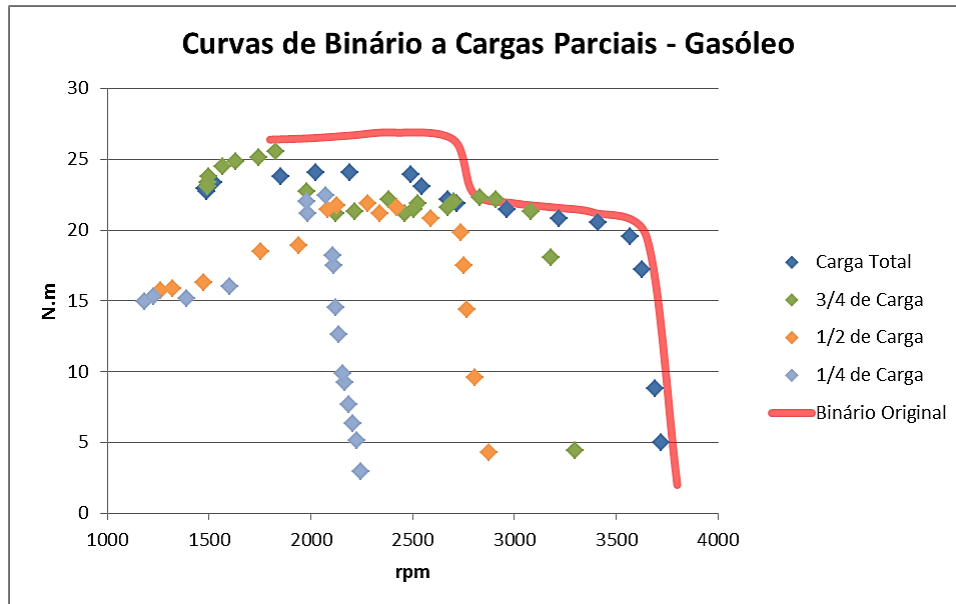


Gráfico 4.6 - Curvas de binário para várias cargas parciais, obtidas com gasóleo.

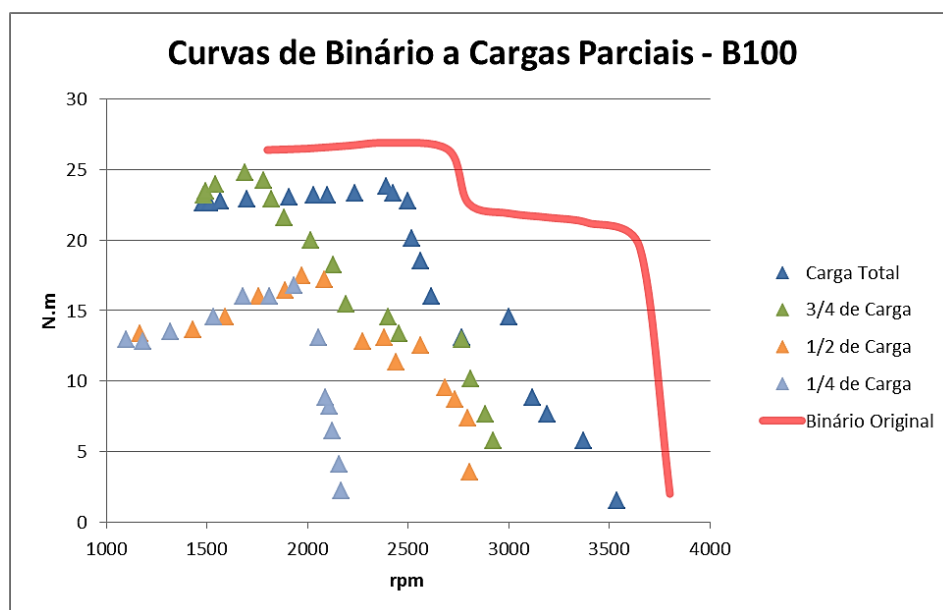


Gráfico 4.7- Curvas de binário para várias cargas parciais, obtidas com B100.

Comparando as curvas de binário relativas ao gasóleo e ao B100 para as diferentes cargas (Gráfico 4.8, Gráfico 4.9, Gráfico 4.10 e Gráfico 4.11) verifica-se que em todos os casos o B100 produz menos binário do que o gasóleo.

Destaque para as curvas obtidas a carga máxima e $\frac{3}{4}$ de carga, em que o binário produzido pelo B100 a baixas rotações é muito próximo do obtido com gasóleo, o que é especialmente visível a carga máxima até às 2500 rpm (Gráfico 4.8), e a $\frac{3}{4}$ de carga até às 1750 rpm (Gráfico 4.9) em que o binário produzido pelo B100 é praticamente igual ao produzido pelo gasóleo.

Embora a $\frac{1}{2}$ carga e a $\frac{1}{4}$ de carga o binário produzido pelo B100 seja inferior ao do gasóleo (Gráfico 4.10 e Gráfico 4.11 respetivamente), existem alguns pontos em que o binário produzido por ambos é relativamente próximo. Isto poderá sugerir que modificando a estratégia de injeção, atrasando a injeção no caso do B100, poder-se-ão obter desempenhos bastante semelhantes, pelo menos em certos regimes de funcionamento.

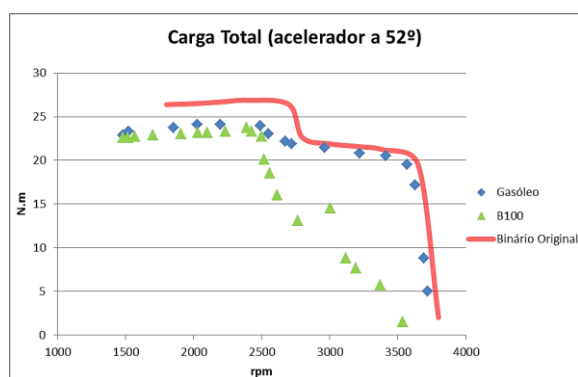


Gráfico 4.8 - Comparação do binário obtido com gasóleo e B100 a carga máxima.

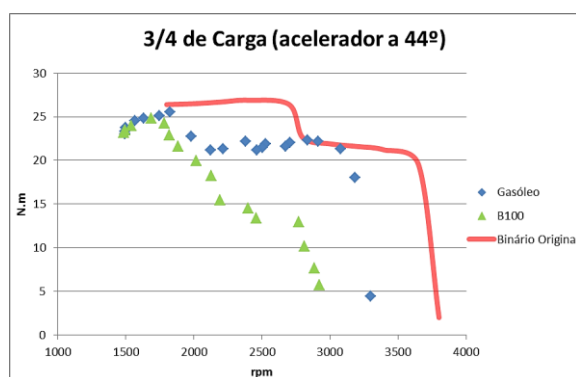


Gráfico 4.9 - Comparação do binário obtido com gasóleo e B100 a $\frac{3}{4}$ da carga.

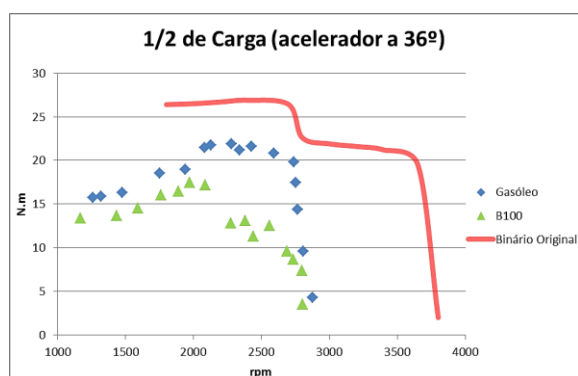


Gráfico 4.10 - Comparação do binário obtido com gasóleo e B100 a $\frac{1}{2}$ da carga.

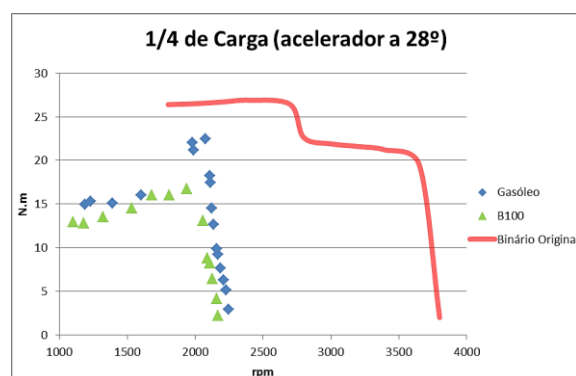


Gráfico 4.11 - Comparação do binário obtido com gasóleo e B100 a $\frac{1}{4}$ de carga.

4.2.2 Curvas de Potência

As curvas de potência a seguir apresentadas foram determinadas a partir dos valores de rotação e binário, obtidos nos testes apresentados anteriormente cujos resultados constam do Anexo G, sendo resultantes da aplicação da equação (4.2). Assim sendo, o andamento das várias linhas terá explicações semelhantes às apresentadas para o caso do binário.

$$\dot{W} = \frac{N \times B}{1000} \quad (4.2)$$

Onde:

\dot{W} – Potência [kW]

N – Velocidade de rotação [rad/s]

B – Binário [N.m]

Da análise do Gráfico 4.12 verifica-se que, de modo análogo ao binário, os valores máximos foram obtidos com gasóleo. A potência máxima foi registada às 2953 rpm, a uma velocidade inferior ao anunciado pelo fabricante.

Ainda no Gráfico 4.12 se pode verificar que até às 2500 rpm todos os combustíveis apresentam valores próximos da curva original, ainda que ligeiramente mais baixos, sendo bastante mais diferenciados acima desta velocidade. Os valores de potência tendem a decrescer com o aumento da percentagem de biodiesel, principalmente acima das 2500 rpm, com exceção do B100 que apresenta uma potência superior ao gasóleo acima das 3000 rpm, o que se pode ver melhor no Gráfico 4.16.

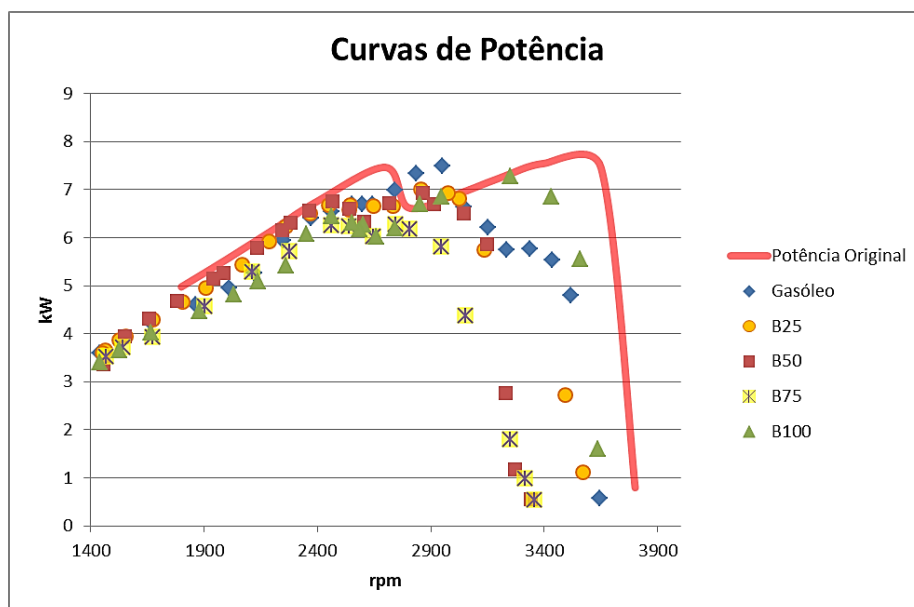


Gráfico 4.12 - Comparação das curvas de potência obtidas com a curva original do motor.

Uma análise mais atenta ao Gráfico 4.13 mostra que a potência obtida com B25, abaixo das 2500 rpm (aproximadamente), é ligeiramente superior em alguns pontos à obtida com gasóleo, o que se verifica de forma mais pronunciada com o B50, como se pode ver no Gráfico 4.14.

De um modo geral, os valores mais baixos de potência foram obtidos com o B75, ainda que às 2100 rpm aproximadamente, o seu valor seja praticamente o mesmo que o obtido com gasóleo, como se pode ver no Gráfico 4.15. Quanto ao B100 (Gráfico 4.16), embora a potência produzida seja ligeiramente menor que a do gasóleo abaixo das 3000 rpm, acima desta velocidade a potência é maior, sendo o valor máximo registado menor em apenas 3% face ao gasóleo.

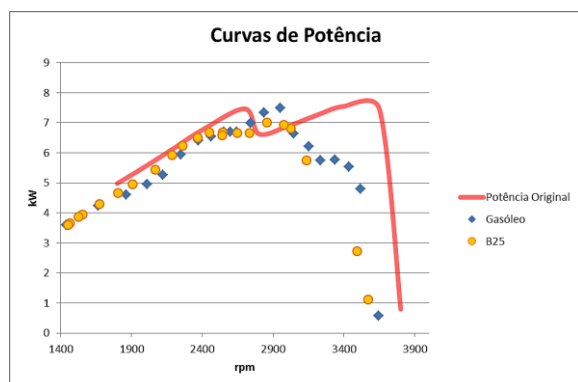


Gráfico 4.13 - Curvas de potência obtidas com gasóleo e B25

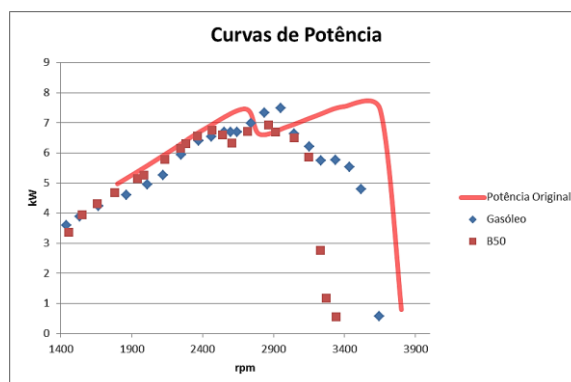


Gráfico 4.14 - Curvas de potência obtidas com gasóleo e B50

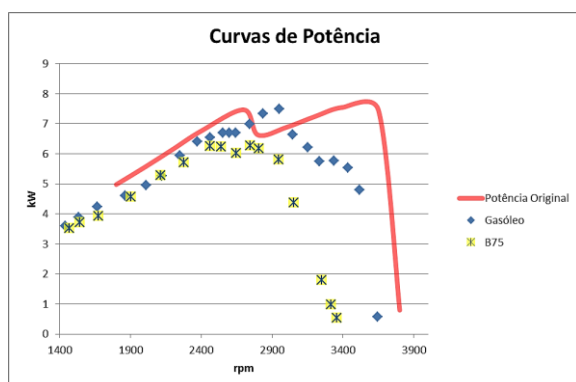


Gráfico 4.15 - Curvas de potência obtidas com gásóleo e B75.

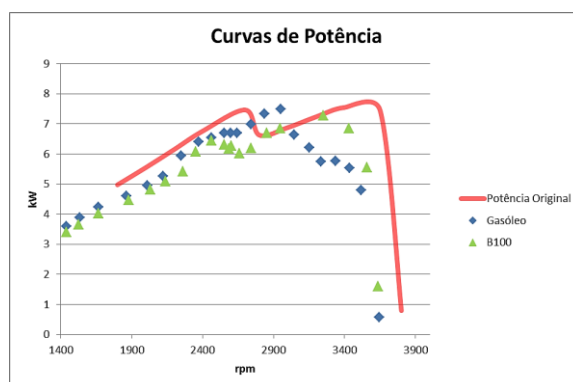


Gráfico 4.16 - Curvas de potência obtidas com gásóleo e B100.

Teste a Cargas Parciais

Da análise aos testes a cargas parciais (Anexo H), verifica-se que, tal como na análise do binário, os resultados obtidos confirmam os resultados apresentados anteriormente, com exceção do B100 acima das 2500 rpm. Também aqui se verifica uma redução da potência com a diminuição da carga de combustível, tanto para o gásóleo (Gráfico 4.17), como para o B100 (Gráfico 4.18), o que de resto era esperado.

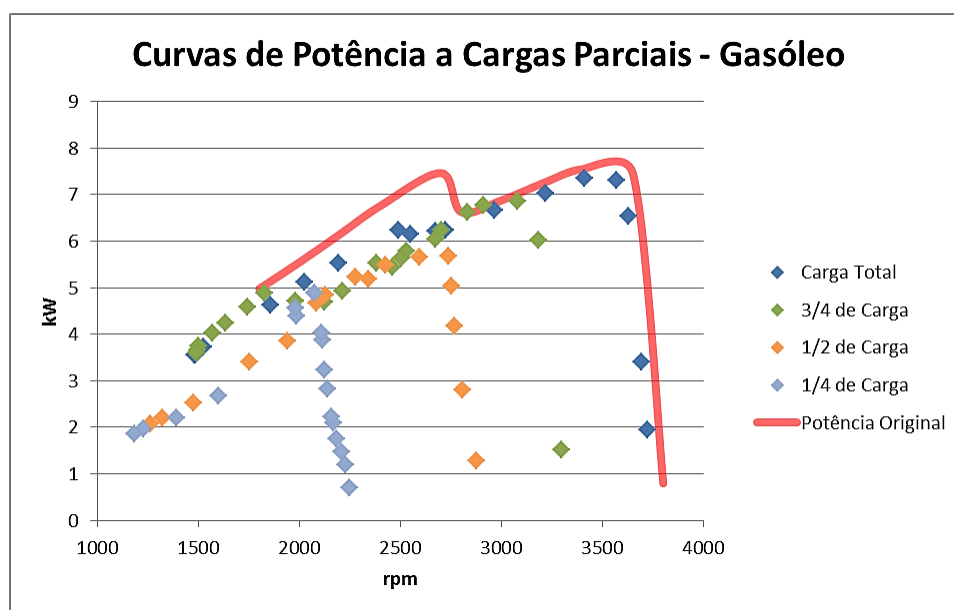


Gráfico 4.17 - Curvas de potência para várias cargas parciais, obtidas com gásóleo.

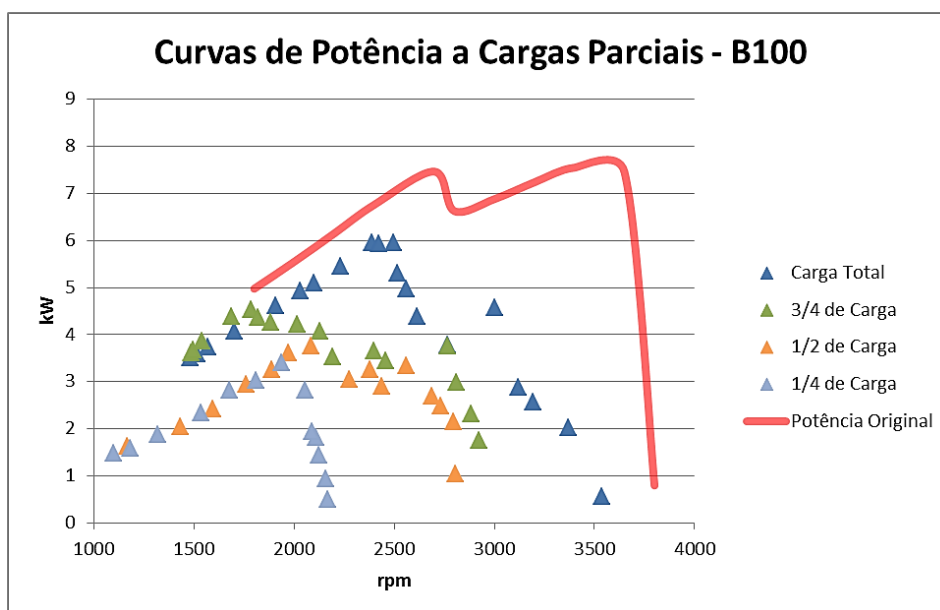


Gráfico 4.18 - Curvas de potência para várias cargas parciais, obtidas com B100.

Comparando o desempenho do gasóleo com o B100 à carga máxima (Gráfico 4.19), verifica-se que a potência produzida pelo B100 é bastante próxima da produzida pelo gasóleo até às 2500 rpm aproximadamente, sendo que para velocidades de rotação superiores a diferença é bastante grande entre os dois combustíveis, o que contraria o resultado anterior, o que se poderá dever à influência de alguns problemas com o sistema de aquisição de dados, conforme já explicado.

O Gráfico 4.20 traduz os resultados obtidos com o motor em funcionamento a $\frac{3}{4}$ da carga. Neste caso a potência produzida pelo B100 é muito inferior à produzida pelo gasóleo, exceto numa pequena faixa de funcionamento até às 1800 rpm em a potência produzida é praticamente igual para ambos. No funcionamento a $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ da carga (Gráfico 4.21 e Gráfico 4.22 respetivamente), embora a potência produzida pelo B100 seja menor, esta diferença não é tão pronunciada, exceto a $\frac{1}{2}$ carga entre as 2100 e 2600 rpm, como se pode ver no Gráfico 4.21.

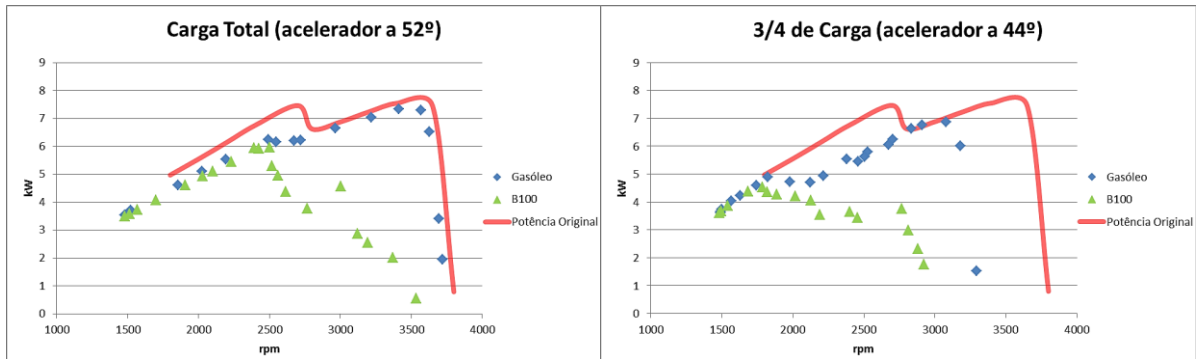


Gráfico 4.19 - Comparação da potência obtida com gásóleo e B100 a carga máxima.

Gráfico 4.20 - Comparação da potência obtida com gásóleo e B100 a 3/4 da carga.

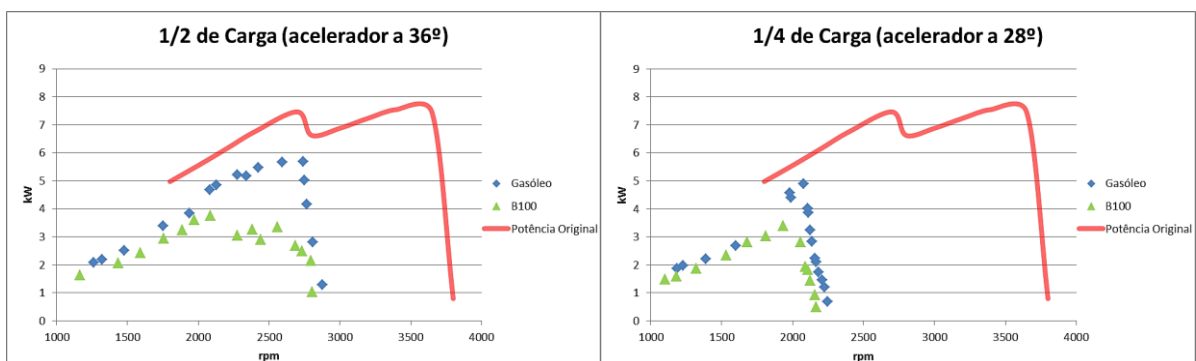


Gráfico 4.21 - Comparação da potência obtida com gásóleo e B100 a 1/2 da carga.

Gráfico 4.22 - Comparação da potência obtida com gásóleo e B100 a 1/4 da carga.

4.2.3 Consumo Específico

A determinação do consumo específico foi efetuada para ambos os combustíveis testados e respectivas misturas, à carga máxima do motor (acelerador a 52°), podendo os valores, relativos aos gráficos que se a seguir se apresentam, ser consultados nas tabelas do Anexo G.

O cálculo deste parâmetro foi feito de acordo com a equação (4.3), tendo o caudal sido determinado conforme explicado anteriormente em 4.1.3.

$$C_s = \dot{m}_f \times \frac{3600}{\dot{W}_e} \quad (4.3)$$

Onde:

C_s – Consumo específico [g/kWh]

\dot{m}_f – Caudal de combustível [g/s]

\dot{W}_e – Potência efetiva [kW]

O poder calorífico do biodiesel é menor do que o do gasóleo pelo que, em condições de funcionamento semelhantes (igual rendimento), os valores relativos ao biodiesel deveriam ser superiores aos do gasóleo em cerca de 10%.

O Gráfico 4.23, mostra as curvas de consumo específico obtidas para cada um dos combustíveis testados. Pode desde logo observar-se que os resultados obtidos, mesmo para o gasóleo, são bastante desfasados da curva original, apresentando por vezes uma tendência inversa. Estes resultados poderão, por um lado, denunciar algum erro induzido pelos problemas mecânicos ocorridos no sistema, potenciados ainda pelo erro inerente ao sistema de pesagem do combustível, mas por outro, justificar de alguma forma os resultados da medição de gases de escape apresentados mais à frente.

Observando ainda o Gráfico 4.23, é perceptível que numa pequena faixa de velocidade, à volta das 2500 rpm, todos os combustíveis apresentam consumos muito próximos, contudo à esquerda e à direita desta zona verifica-se que, de um modo geral, há uma inversão nos consumos, ou seja, os combustíveis que apresentam mais baixos consumos a baixas velocidades de rotação, são os que apresentam consumos que tendem a ser mais elevados a altas velocidades. De destacar o B25, o B50 e o B75 que apresentam um elevado consumo perto da velocidade máxima de funcionamento, o que poderá indicar o mau funcionamento do injetor ou da bomba.

Um exemplo disso é o B25, melhor apresentado no Gráfico 4.24, que abaixo das 2500 rpm apresenta o consumo mais baixo de todos, exibindo um consumo dos mais altos acima desta velocidade de rotação. O que se verifica também com o B50 (Gráfico 4.25) e B75 (Gráfico 4.26) que apresentam consumos muito elevados acima desta velocidade, em que acontece uma redução muito significativa do binário, provavelmente por o motor não funcionar bem a velocidades elevadas, o que poderá ser efeito do deficiente funcionamento dos injetores ou da bomba. Pela análise destes gráficos e ainda do Gráfico 4.27, que representa as curvas obtidas com B100, verifica-se que, abaixo da 2500 rpm, o consumo sobe com o aumento da quantidade de biodiesel na mistura, aproximando-se do consumo apresentado pelo gasóleo.

Comparando o consumo do B100 com o do gasóleo (Gráfico 4.27), observa-se ainda que, contrariamente ao esperado, este apresenta um consumo inferior em praticamente todas as velocidades, exceto entre as 2500 e as 3000 rpm.

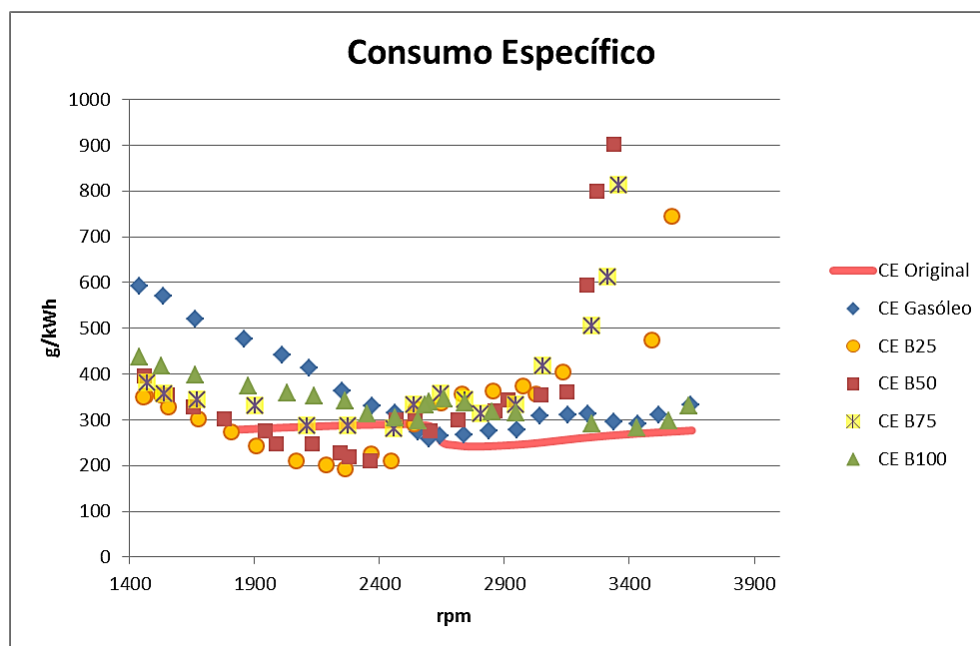


Gráfico 4.23 - Curvas de consumo específico dos vários combustíveis testados.

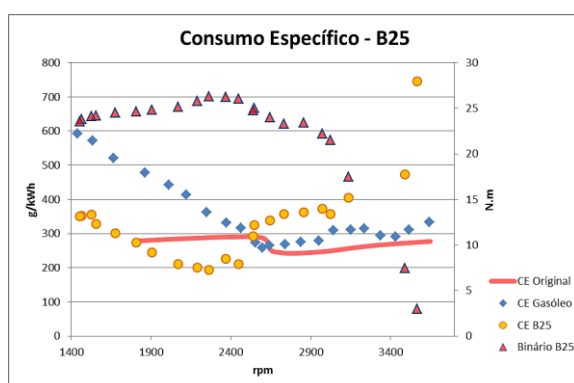


Gráfico 4.24 - Consumo específico obtido com B25.

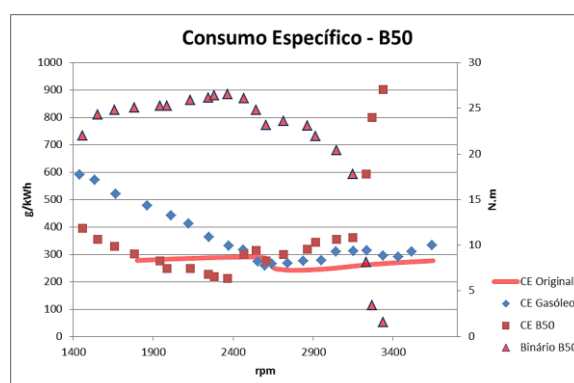


Gráfico 4.25 - Consumo específico obtido com B50.

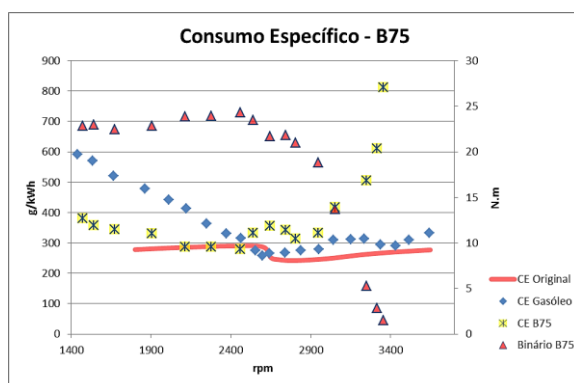


Gráfico 4.26 - Consumo específico obtido com B75.

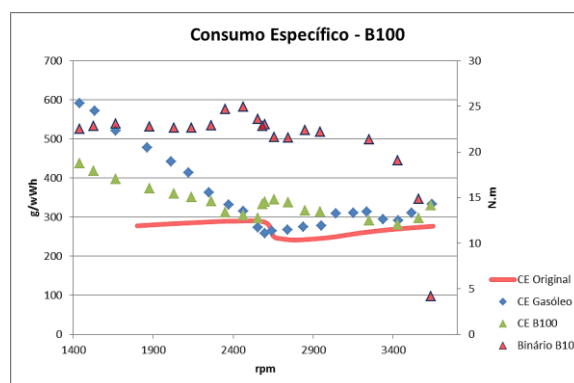


Gráfico 4.27 - Consumo específico obtido com B100.

4.2.4 Rendimento

A determinação do rendimento do motor para os vários combustíveis testados foi efetuada com base na equação 4.4.

$$\eta = \frac{3,6 \times 10^6}{C_s \times Q_f} \quad 4.4$$

Onde:

η – Rendimento [%]

C_s – Consumo específico [g/s]

Q_f – Poder calorífico inferior [kJ/kg]

Não sendo conhecidos os valores exatos do PCI dos combustíveis utilizados, o cálculo do rendimento efetuou-se com base nos valores do PCI indicados na Tabela 2.6, tendo os valores de PCI referentes às misturas binárias sido determinados com base nesses mesmos valores, os quais se apresentam na Tabela 4.2, sendo nesta mesma tabela apresentados também os rendimentos médios obtidos para cada combustível.

Tabela 4.2 - Poderes caloríficos e rendimentos obtidos para cada combustível.

Combustível	PCI [kJ/kg]	Rendimento Médio [%]
Gasóleo	42540	25,4
B25	41183	29,1
B50	39858	28,5
B75	38564	25,7
B100	37300	28,9

Pela observação dos valores apresentados na Tabela 4.2 verifica-se que, em termos de rendimento médio, o pior resultado foi obtido com o gasóleo, sendo que os valores obtidos para o B25, B50 e B100 traduzem o melhor desempenho, encontrando-se bastante próximos entre si.

No Gráfico 4.28, cujos valores se encontram listados nas tabelas do Anexo G, são apresentadas as curvas de rendimento relativas aos vários combustíveis testados. A velocidade

abaixo das 2300 rpm (aproximadamente), é notório o superior rendimento relativo ao B25, apresentando o gasóleo o pior desempenho. Acima desta velocidade, de um modo geral o B100 apresenta um melhor comportamento, principalmente acima das 2900 rpm, apresentando o B25 dos piores rendimentos a altas velocidades de rotação.

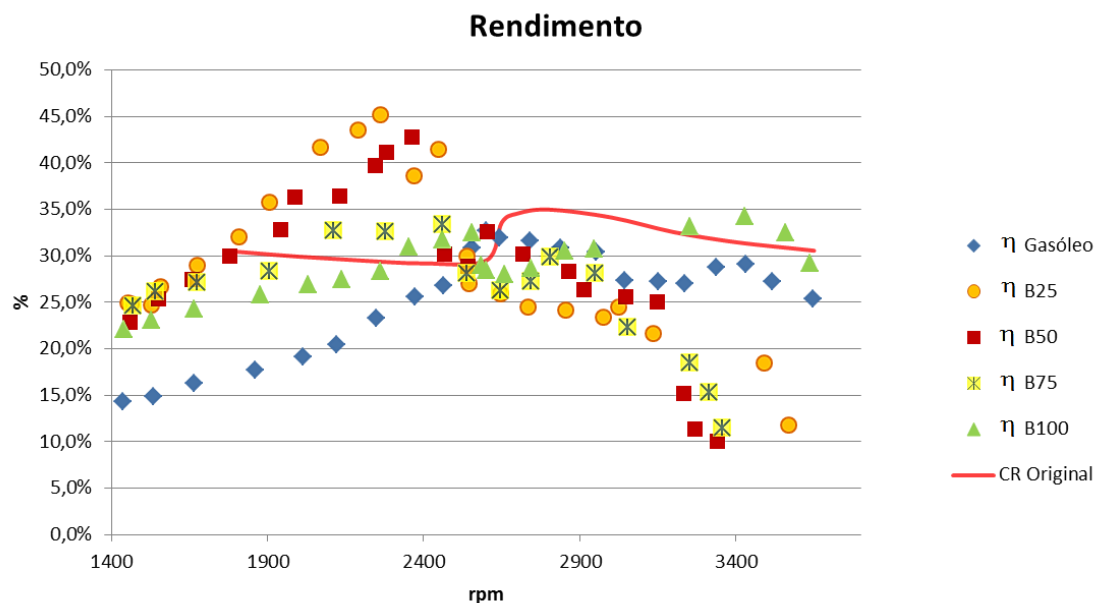


Gráfico 4.28 - Rendimentos do motor obtidos com os vários combustíveis testados.

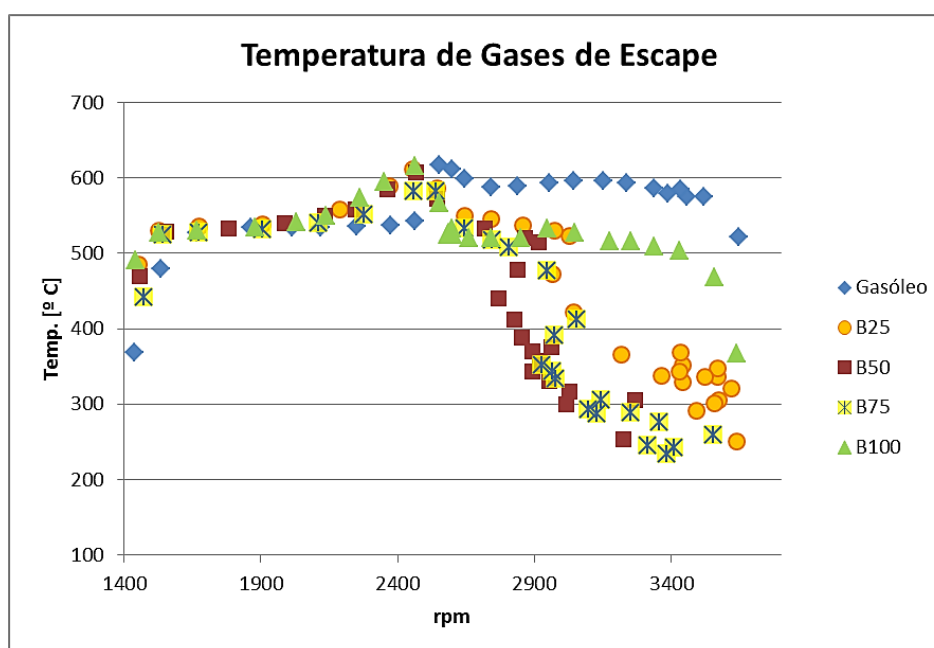
4.2.5 Temperaturas

Ao longo dos testes foram medidas as temperaturas em três pontos considerados essenciais no motor, além de se monitorizarem também a temperatura ambiente e temperatura do ar à entrada da admissão. Nestes dois últimos pontos não se registou uma variação significativa ao longo dos testes, pelo que se apresentam os correspondentes valores médios na Tabela 4.3. Os valores registados ao longo dos testes encontram-se compilados nas tabelas do Anexo I. Recorde-se que todos os testes tiveram uma duração aproximada entre 12 a 14 min, pelo que a influência do tempo de funcionamento nas temperaturas é reduzida.

Tabela 4.3 - Temperaturas médias registadas durante a realização dos testes.

Combustível	Temp. Ambiente [°C]	Temp. Ar Admissão [°C]
Gasóleo	23,7	50,2
B25	26,1	52,2
B50	26,6	52,7
B75	25,0	52,3
B100	25,0	51,7

No Gráfico 4.29 podem observar-se as curvas de temperatura relativas aos gases de escape. À semelhança do que ocorre nos restantes parâmetros já analisados, verifica-se uma grande uniformidade na evolução da temperatura dos gases de escape nos diferentes combustíveis até cerca das 2400 rpm, sendo que acima deste ponto se verifica uma considerável dispersão. Acima das 2400 rpm verifica-se uma diminuição bastante acentuada da temperatura com o aumento da percentagem de biodiesel nas misturas. Contudo uma vez mais o B100 apresenta um comportamento distinto, sendo que apesar de apresentar uma temperatura mais baixa do que o gasóleo em cerca de 100°C, contraria a tendência de redução da temperatura com o aumento de teor de biodiesel. Uma análise mais atenta sugere que esta relação ocorre até uma certa percentagem visto que, de todos, o B50 apresenta a temperatura mais baixa e o B75 uma temperatura ligeiramente superior.


Gráfico 4.29 – Curvas de temperatura dos gases de escape.

Relativamente às curvas de temperatura de óleo do motor, representadas no Gráfico 4.30, pode observar-se que de um modo geral apresentam todo o mesmo perfil, sendo a variação máxima entre as curvas dos diferentes combustíveis de cerca de 15°C. Este valor é considerado aceitável visto que o tempo de paragem do motor entre os diferentes testes não foi controlado, sendo umas paragens mais longas do que outras em função do tempo gasto em pequenos ajustes, o que de algum modo se confirma pelo facto de os testes das misturas entre si não terem requerido nenhuma atenção especial além dos procedimentos inerentes à troca de combustível.

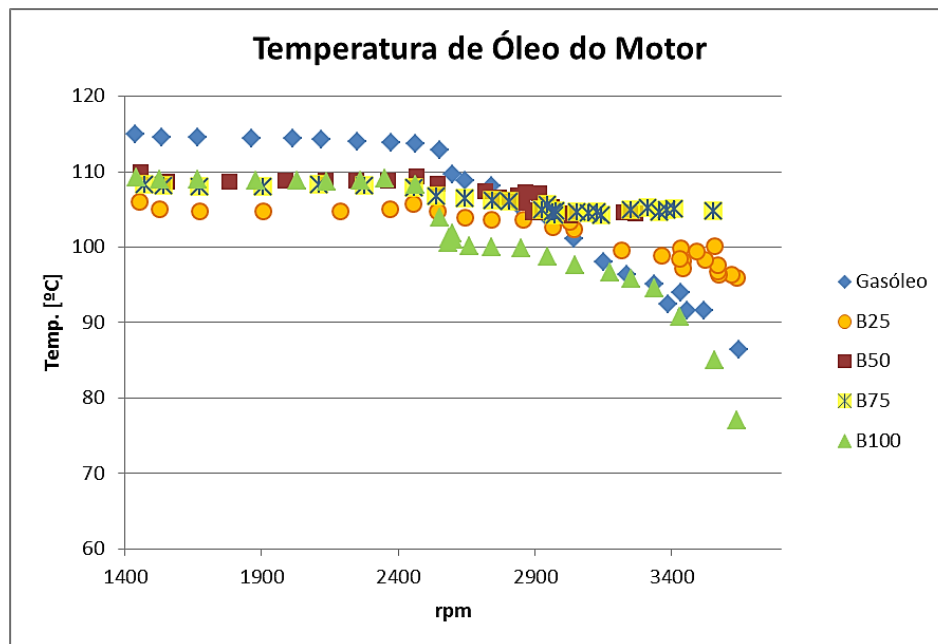


Gráfico 4.30 – Curvas de temperatura do óleo do motor.

Quanto à temperatura da culassa, cujas curvas se apresentam no Gráfico 4.31, verifica-se desde logo uma diferença considerável entre as temperaturas registadas com gasóleo e com os restantes combustíveis. No entanto pode observar-se também que o perfil destas é bastante idêntico. Esta discrepância justifica-se pelo facto de no final dos testes se ter detetado um ligeiro deslocamento do termopar instalado nessa zona do motor, o que certamente ocorreu devido as vibrações provocadas pelo funcionamento do motor. Todavia, tendo em conta o perfil semelhante das curvas de todos os combustíveis, o facto do teste com gasóleo ter sido o primeiro a ser efetuado, e da variação nos restantes combustíveis ser da ordem dos 5°C, poderá concluir-se que a temperatura deste componente não é significativamente afetada pelo tipo de combustível utilizado nos ensaios.

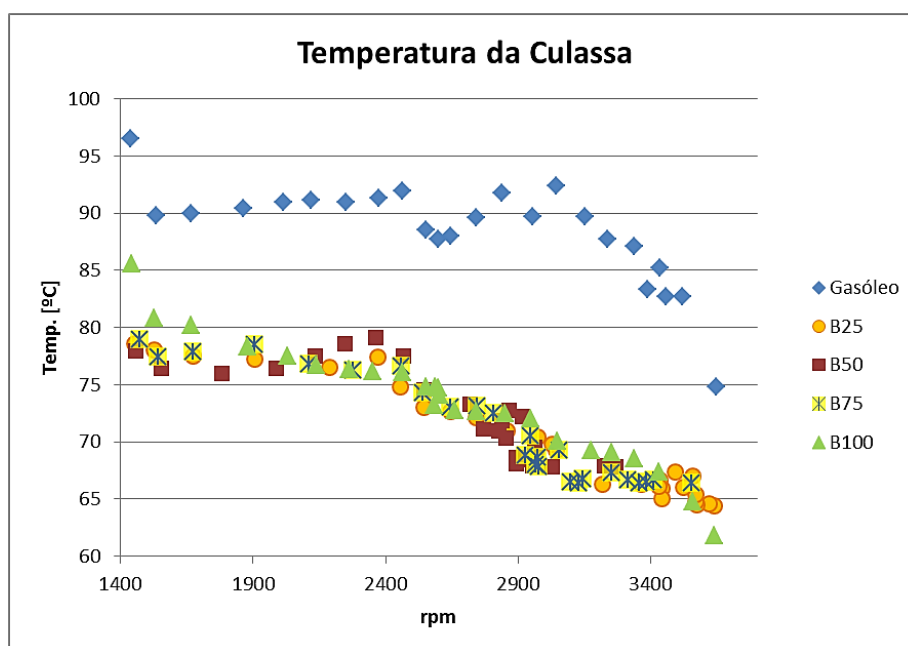


Gráfico 4.31 – Curvas de temperatura no exterior da culassa.

4.2.6 Emissões de Gases de Escape

A análise das emissões de gases de escape dos vários combustíveis foi efetuada conforme o descrito em 4.1.2. Os resultados que a seguir se apresentam foram obtidos com o motor a carga total (posição do acelerador a 52°). Nesta análise foram medidas as emissões de oxigénio (O_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e óxido de azoto (NO_x), cujos resultados se encontram compilados nas tabelas do Anexo J.

Em qualquer dos gráficos apresentados, abaixo das 2900 rpm praticamente não existem dados para análise. Isto deve-se ao modo de funcionamento do equipamento de recolha e análise dos gases, o qual cessa a análise logo que um dos componentes alcance o limite de trabalho da máquina, no caso verificou-se ser o CO o componente que atingia o valor máximo lido pelo equipamento. Daqui se conclui portanto que todos os combustíveis testados produziram emissões de CO acima do limite legal.

Outra situação a registar é a dispersão de resultados relativamente às misturas (Gráfico 4.33, Gráfico 4.34 e Gráfico 4.35), o que se poderá dever ao facto de se ter verificado alguma flutuação na velocidade de rotação aquando da realização dos ensaios, como de resto já se explicou anteriormente. Assim, considerando apenas as velocidades acima das 2900 rpm, verifica-se uma tendência de aumento de produção de O_2 com o aumento de biodiesel nas misturas, o que é

particularmente visível na comparação do gasóleo (Gráfico 4.32) com o biodiesel (Gráfico 4.36), produzindo este último uma percentagem ligeiramente maior.

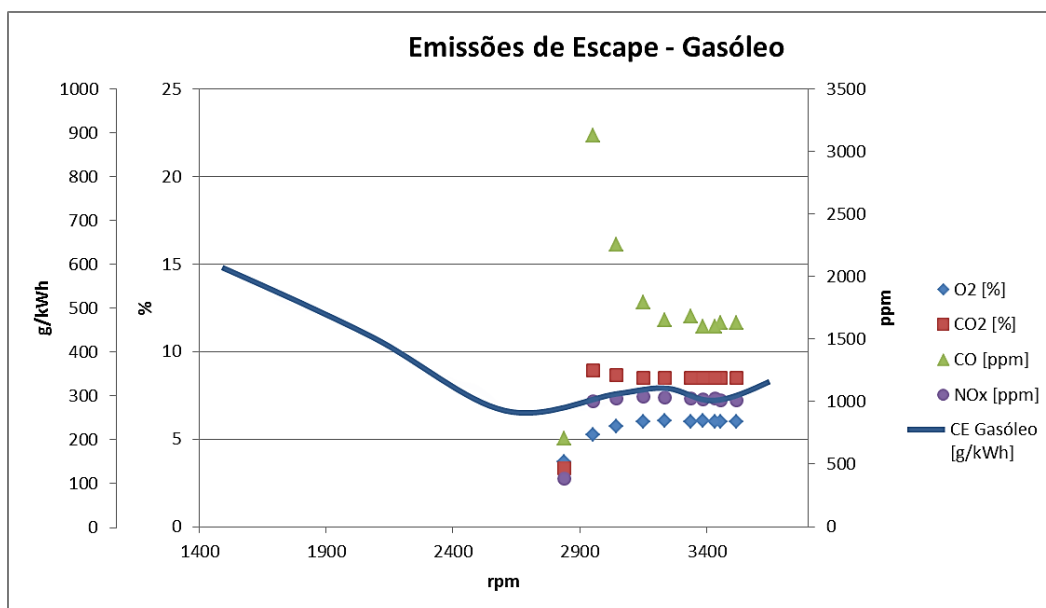


Gráfico 4.32 - Emissões de escape produzidas pelo Gasóleo.

No caso do CO_2 , a percentagem produzida pelo biodiesel é menor do que no gasóleo, ainda que os valores sejam bastante próximos. Relativamente aos restantes combustíveis (B25, B50 e B75) representados no Gráfico 4.33, Gráfico 4.34, e Gráfico 4.35 respetivamente, apesar dos valores dispersos rondarem os 8,5% é possível visualizar uma ligeira tendência de redução com o aumento da percentagem de biodiesel na mistura.

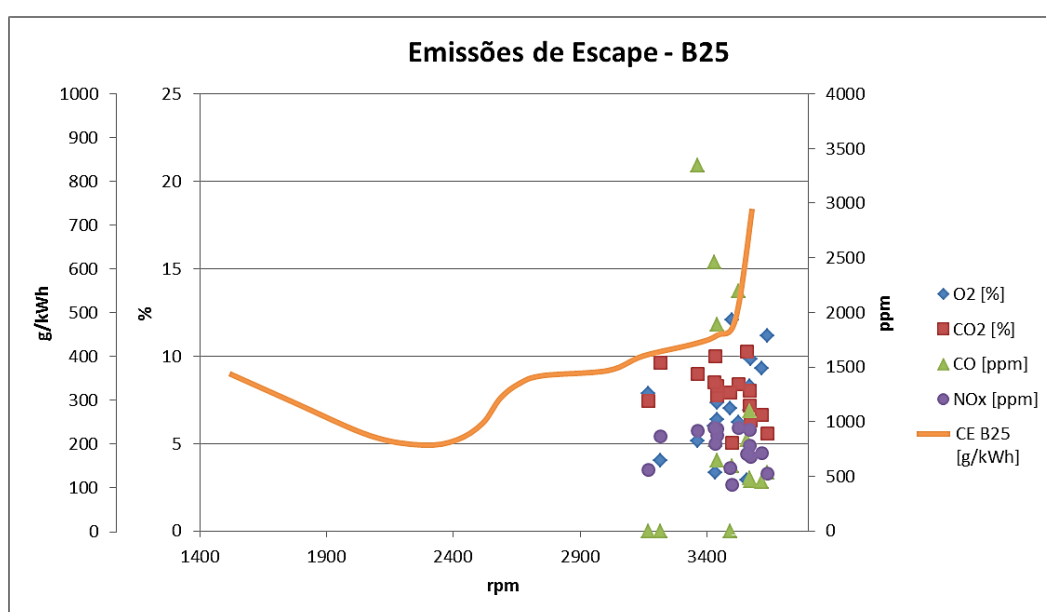


Gráfico 4.33 - Emissões de escape produzidas pelo B25.

A medição do monóxido de carbono apenas se mostra estável no caso do gasóleo (Gráfico 4.32), apresentando-se bastante instável nos restantes combustíveis. A avaliar pelos picos registados nos diferentes testes, parece notar-se uma tendência de aumento nestas emissões com o aumento da percentagem de biodiesel utilizado.

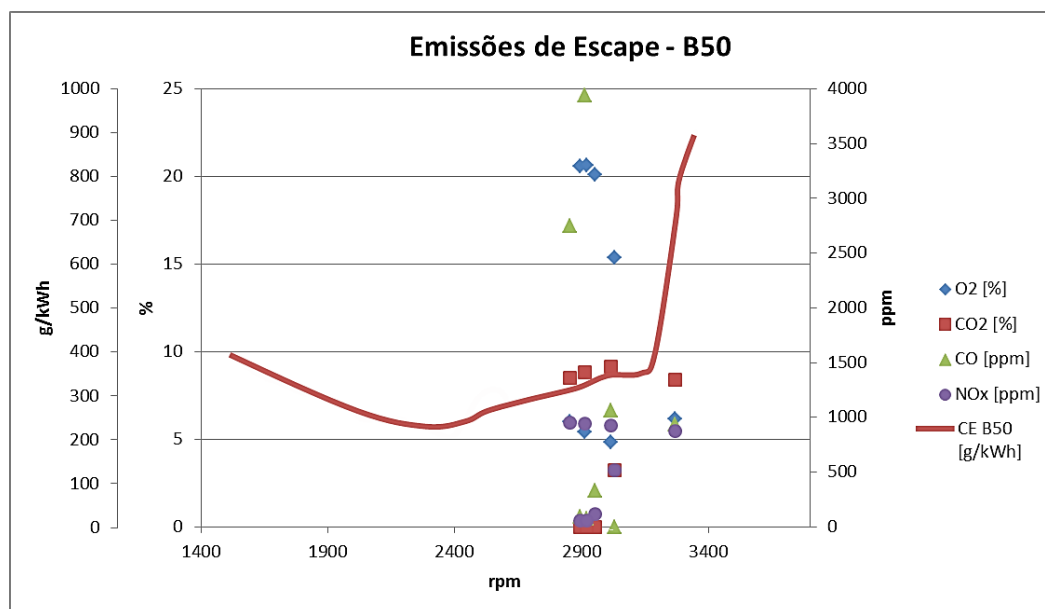


Gráfico 4.34 - Emissões de escape produzidas pelo B50.

Quanto aos NO_x, contrariamente ao esperado, os valores mais elevados são apresentados pelo gasóleo (Gráfico 4.32), embora com o aumento do teor de biodiesel este valor tenda a descer (Gráfico 4.33, Gráfico 4.34 e Gráfico 4.35), o seu valor volta a ficar muito próximo dos NO_x produzidos pelo gasóleo com a utilização do B100 (Gráfico 4.36).

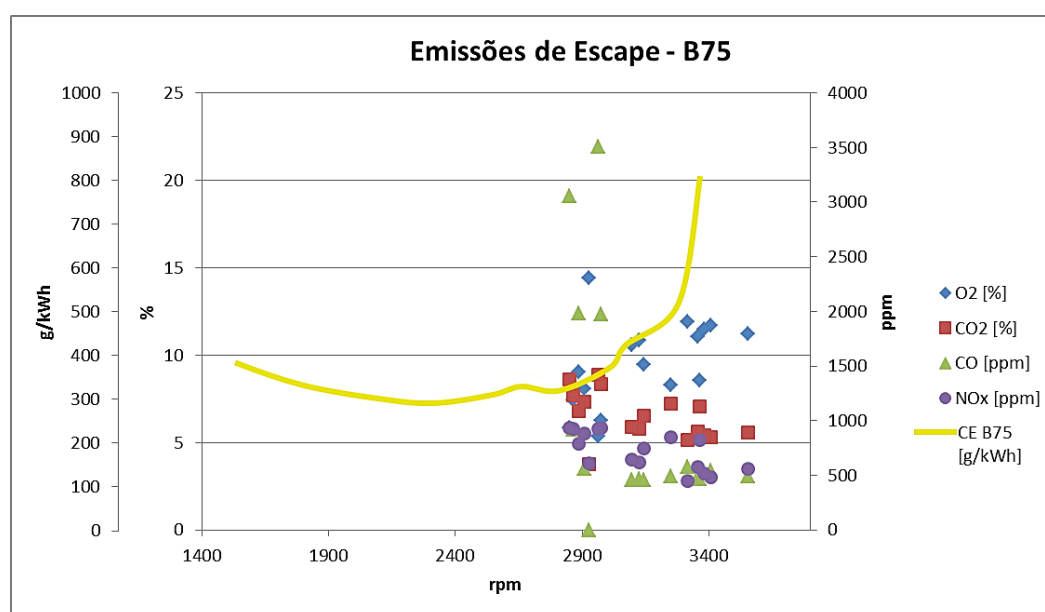


Gráfico 4.35 - Emissões de escape produzidas pelo B75.

Da análise destes resultados resulta que os valores obtidos na medição das emissões são bastante díspares do esperado, em especial o facto de, em todos os casos, os valores medidos ultrapassarem o limite do equipamento de medição. Embora pelos valores de binário e potência registados se possa concluir que o motor funcionou de forma aceitável, os consumos registados associados aos valores de emissões poderão sugerir que problemas de injeção e atomização de combustível, os quais poderão ter contribuído para uma deficiente queima da mistura, o que poderá, em parte, justificar os resultados obtidos.

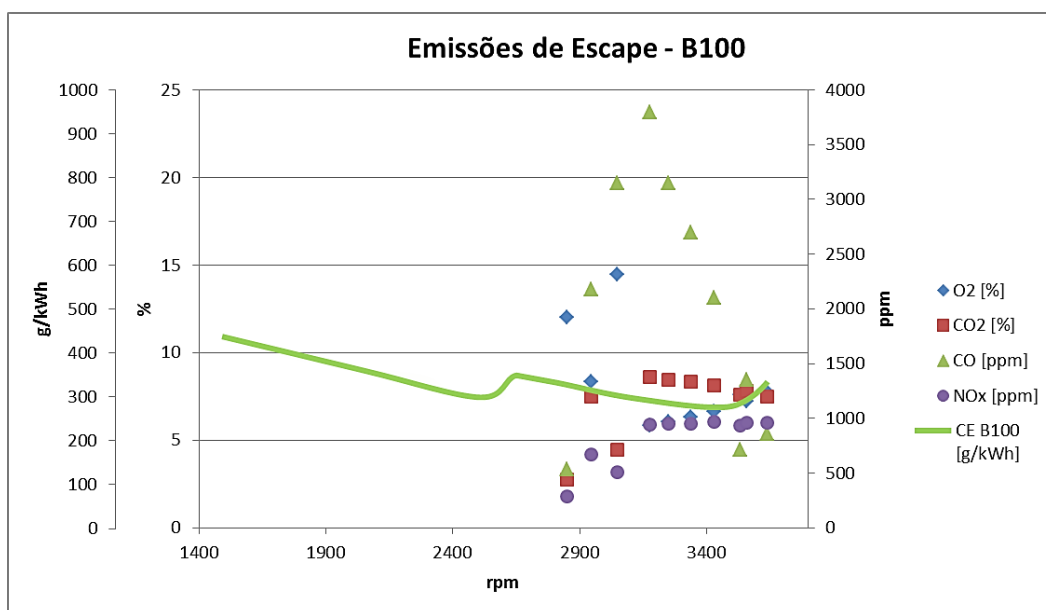


Gráfico 4.36 - Emissões de escape produzidas pelo B100.

4.2.7 Diagramas de Desempenho

A elaboração dos diagramas de desempenho de um motor requer, além da medição do binário e determinação da potência a cargas parciais, a determinação dos respetivos consumos específicos. Quanto ao binário e potência, os valores destes parâmetros a cargas parciais foram já apresentados nas secções 4.2.1 e 4.2.2, respetivamente. Todavia, conforme explicado, esses valores foram determinados com base na variação da tensão da célula de carga com o auxílio de um multímetro, e pela observação direta da variação dos valores da velocidade de rotação, o que ocorreu numa fase em que acabava de se iniciar o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados, também já apresentado. A par disto, ainda não tinha sido estudado nesta fase a forma de medição do caudal de combustível.

Não tendo, na altura sido previstos os constrangimentos descritos, não foi assim possível realizar novos testes com medição do caudal de combustível, o que inviabiliza o cálculo e apresentação do diagrama de desempenho, o qual se incluirá no capítulo dos trabalhos futuros sugeridos, que se apresenta mais adiante.

5 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Neste capítulo, além das conclusões referentes ao trabalho experimental, são também abordados alguns aspetos relativos à preparação laboratorial, a qual representa uma parte importante de todo o trabalho desenvolvido. Em função de tudo isto, são ainda registadas algumas notas sugestivas relativamente a possíveis trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Antes de mais importa recordar que o presente trabalho foi fortemente condicionado por restrições de ordem financeira que impediram a aquisição do material adequado ao tipo de estudo definido nos objetivos iniciais. A par disto, algumas restrições também em termos de tempo, pois as várias tentativas levadas a cabo no sentido de se obter o material necessário, designadamente um motor diesel com a respetiva eletrónica, e operacionalização do freio dinamométrico, traduziram-se em alguma indefinição quanto ao rumo a seguir, o que acabou por atrasar bastante o início dos trabalhos práticos. Devido a estas condicionantes, recorreu-se apenas ao material disponível no laboratório, perdendo-se assim carácter inovador deste trabalho cujo objetivo seria verificar, através do teste de biocombustíveis, nomeadamente biodiesel, o aumento das prestações do motor usando o mesmo limite de fumo estabelecido para o gasóleo.

5.1.1 Preparação Laboratorial

Muito do trabalho prático desenvolvido ocorreu em torno de motores a gasolina, bem como no desenvolvimento, reparação e adaptação de vários componentes necessários. Apesar destes trabalhos se desviarem um pouco do âmbito do tema desta dissertação, foi importante a sua execução, pois permitiram que a ampliação e o aprofundamento do conhecimento obtido pelo grupo de trabalho do Laboratório de Motores do DEM não se restringissem apenas ao biodiesel e ao motor diesel.

Concretamente, além de dos sistemas que se deixaram desenvolvidos, saíram enriquecidos os conhecimentos nas seguintes áreas:

- Eletricidade e eletrónica automóvel, pelo trabalho desenvolvido em torno da instalação elétrica, teste e funcionamento eletrónico de diversos componentes do motor Opel;

- Mecânica dos motores de explosão e de ignição por compressão, pelo trabalho de reparação em diversos componentes dos motores Opel, Yanmar, e BMW;
- Mecânica dos freios, hidráulico e dinamométrico, pelas intervenções na adaptação e reparação das estruturas destes, em especial no freio hidráulico;
- Conhecimentos de eletrônica, pela colaboração na construção e desenvolvimento do sistema de aquisição de dados.

5.1.2 Trabalho Experimental

No que concerne aos ensaios efetuados com o motor diesel, os resultados obtidos parecem refletir alguma influência do mau funcionamento do equipamento já que estes não se apresentam tão claros como o que era esperado. acerca dos resultados obtidos pelos testes efetuados com gasóleo, biodiesel e misturas binárias de ambos (B25, B50 e B75), conclui-se que :

Relativamente ao binário, conforme se pode ver na Tabela 5.1, os valores mais elevados foram obtidos com o B50, sendo o B75 o que apresenta piores resultados. Comparando o gasóleo como o B100, o primeiro apresenta um binário superior ao segundo, em 0,77 N.m.

Quanto à potência, o valor mais elevado foi obtido com o gasóleo, sendo o valor mais baixo obtido com o B75. Uma vez mais, comparando o gasóleo com o B100 verifica-se que os valores máximos são muito próximos, apresentando o gasóleo uma potência superior à do B100 em apenas 0,23 kW. Estes resultados são também evidentes a cargas parciais em que o B100 apresenta valores de potência e binário inferiores aos do gasóleo.

Considerando o comportamento das curvas de potência e binário, aliados às características do biodiesel, os resultados sugerem que, recorrendo à alteração da estratégia de injeção, o que se poderá experimentar num tipo de motor em que o controlo deste parâmetro se possa fazer eletronicamente, poderá observar-se uma melhoria do desempenho (maior binário e potência) tanto das misturas binárias como do B100.

Tabela 5.1 - Potência e binário máximos para os diversos combustíveis testados.

Combustível	Binário máx. [N.m]	Potência máx. [kW]
Gasóleo	25,75 às 2373 rpm	7,50 às 2953 rpm
B25	26,32 às 2263 rpm	7,0 às 2856 rpm
B50	26,54 às 2364 rpm	6,93 às 2863 rpm
B75	24,29 às 2460 rpm	6,28 às 2744 rpm
B100	24,98 às 2462 rpm	7,27 às 3252 rpm

Em termos de consumo específico e rendimento, apresentam-se na Tabela 5.2 os valores obtidos em termos médios. O B25 apresenta o menor consumo específico em termos médios. Comparando o gasóleo e o B100, o consumo específico obtido com o primeiro é superior ao obtido com o B100.

Relativamente ao rendimento, o B100 apresenta o melhor resultado em termos médios. Analisando os restantes combustíveis, o gasóleo apresenta o pior rendimento médio de todos os combustíveis, em oposição ao B25 que apresenta o rendimento mais elevado.

Tabela 5.2 - Consumo específico e rendimento médios obtidos.

Combustível	Consumo específico médio [g/kWh]	Rendimento médio [%]
Gasóleo	355,01	25,39
B25	330,58	29,06
B50	365,47	28,48
B75	393,11	25,72
B100	339,03	28,85

Relativamente às emissões de escape, estas revelam-se inconclusivas. Em todos os casos as emissões de CO atingiram o valor limite do equipamento de medição, logo o limite legal, tendo sido apenas possível medir numa pequena faixa de velocidades de rotação compreendida entre as 2900 e as 3500 rpm. Considerando apenas esta faixa de funcionamento, os valores registados

apresentam-se algo dispersos principalmente no que respeita às misturas binárias. Comparando o gasóleo e o B100, os valores de NO_x registados são muito próximos para ambos, embora no caso do B100 os valores sejam ligeiramente inferiores, o que contraria a ideia geral exposta na bibliografia consultada. A mesma tendência se verifica relativamente às emissões de CO que, segundo a bibliografia consultada, deveriam ser muito inferiores, mas que neste estudo se mostram excessivas em todos os casos, atingindo mesmo o limite de trabalho do equipamento utilizado. No caso do CO_2 os valores registados para o gasóleo e para o B100 apresentam-se muito próximos. A percentagem de oxigénio presente nos gases de escape mostrou-se inferior no caso do gasóleo, registando-se um máximo de cerca de 6%, apresentando o B100 cerca de 8%.

Um dos componentes que não foi possível medir foi a opacidade. O problema do gasóleo deverá ser a produção de fumos que aumenta com a diminuição da velocidade do motor (facto que apenas se constatou por observação direta), o que não aconteceu de forma tão acentuada com o biodiesel. Poderá isto ser uma boa indicação de que o biodiesel funcione melhor do que o gasóleo, produzindo menos fumo, e consequentemente possa ter o potencial de produzir potências superiores às produzidas pelo gasóleo, para o mesmo limite de fumos estabelecido para este.

5.2 TRABALHO FUTURO

Conforme já referido o trabalho realizado foi bastante condicionado, não tendo sido possível atingir os objetivos iniciais. Apesar disso, alguns resultados apresentados carecem de confirmação, dada a possibilidade de neles se refletir alguma influência do funcionamento deficiente de alguns equipamentos. Assim, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros relativamente à replicação do estudo efetuado:

- Medição de binário e potência com um freio dinamométrico;
- Determinação do consumo específico com base na medição de caudal de combustível;
- Modificação do sistema de injeção de forma a poder variar o seu avanço;
- Medição da pressão dentro do cilindro;
- Inclusão da medição de HC e opacidade na análise dos gases de escape.

Relativamente aos diversos componentes disponíveis no laboratório do DEM, há que registar algumas notas relativas ao seu estado de funcionamento, designadamente:

- O freio hidráulico, cujo mau funcionamento, apesar das várias reparações efetuadas, poderá ter influenciado os resultados obtidos. Sobre este equipamento é recomendável a retificação de todos os furos, e substituição de todos os parafusos e pivôs, por outros com medidas em sistema métrico.
- O sistema de aquisição de dados construído, que poderá, apesar de todos os testes a que foi submetido, requerer alguns melhoramentos tendo em vista um melhor desempenho em motores diferentes daqueles que se utilizaram no seu desenvolvimento;
- O motor diesel Yanmar, cujo deficiente desempenho que foi registado em algumas situações, em especial quando alimentado com biodiesel, poderá ser sanado, ou pelo menos minimizado com a execução de uma revisão e limpeza completa.

Numa perspetiva mais alargada sobre a utilização do biodiesel nos motores diesel, sugerem-se também os seguintes trabalhos:

- Estudo comparativo do desempenho do biodiesel em motores com injeção do tipo *common rail*, e motores equipados com sistemas de injeção mais antigos;
- Estudo do desempenho do biodiesel num motor diesel, com sistema de injeção do tipo *common rail*, em termos de potência, binário e emissões de escape;
- Otimização da estratégia de injeção para biodiesel;
- Estudo e desenvolvimento de um sistema que permita o ajuste automático do sistema de injeção em função do combustível utilizado (gasóleo, biodiesel e respetivas misturas)
- Estudo do aumento das prestações do motor, usando o mesmo limite de poluentes impostos ao gasóleo;
- Estudo da influência de aditivos no desempenho de biodiesel nos motores diesel.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- [1] S. C. Silva, Breve Enciclopédia do Biodiesel, Vida Económica, 2009.
- [2] R. Gomes, Manual do Biodiesel, Litexa Editora, 2006.
- [3] P. Coelho e M. Costa, Combustão, Amadora: Edições Orion, 2007.
- [4] J. Martins, Motores de Combustão Interna, 2ª ed., Publindústria, Edições Técnicas, 2006.
- [5] A. Demirbas and M. F. Demirbas, Algae Energy - Algae as a New Source of Biodiesel, London: Springer, 2010.
- [6] K. Owen e T. Coley, Automotive Fuels Handbook, SAE Ed., 1990.
- [7] D. Rutz and R. Janssen, Biofuel Technology Handbook, 2ª ed., WIP, 2008.
- [8] A. Demirbas, Biodiesel- A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines, London: Springer, 2008.
- [9] G. Knothe, J. Kahl e J. V. Gerpen, The Biodiesel Handbook, 2ª ed., AOCS Press, 2010.
- [10] G. Montero and M. Stoytcheva, Eds., Biodiesel - Quality, Emissions and By-Products, Intech, 2011.
- [11] S.-Y. No, "Application of hydrotreated vegetable oil from triglyceride based biomass to CI engines - A review," *Fuel*, vol. 115, pp. 88-96, 2014.
- [12] G. Knothe, J. V. Gerpen e J. Kahl, The Biodiesel Handbook, AOCS Press, 2005.
- [13] M. Lapuerta, J. Rodríguez-Fernández, J. R. Agudelo e A. L. Boehman, "Blending scenarios for soybean oil derived biofuels with conventional diesel," *Biomass and Bioenergy*, vol. 49,

- pp. 74-85, 2013.
- [14] A. C. M. d. Farias, J. S. d. Santana, M. F. O. Filho, J. S. d. Santana, C. R. F. Barbosa e J. d. Medeiros, “Os Combustíveis Verdes do Brasil - Avaliação da Lubricidade do Biodiesel B5 e Óleos de Mamona e Coco,” *Holos*, vol. 3, pp. 3-17, 2011 (Ano 27).
 - [15] J. C. J. Bart, N. Palmeri e S. Cavallaro, *Biodiesel Science and Technology - From Soil to oil*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited and CRC Press, 2010.
 - [16] H. Aatola, M. Larmi e T. Sarjovaara, “Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: trade.off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine,” *SAE Technical Paper Series, No.2008-01-2500*, 2008.
 - [17] Infopédia, “Compressibilidade,” Porto Editora, 2003-2013. [Online]. Available: [http://www.infopedia.pt/\\$compressibilidade](http://www.infopedia.pt/$compressibilidade). [Acedido em 2 Dezembro 2013].
 - [18] M. Lapuerta, J. R. Agudelo, M. Prorok e A. L. Boehman, “Bulk Modulus of Compressibility of Diesel/Biodiesel/HVO Blends,” *Energy & Fuels*, vol. 26, pp. 1336-1343, 2012.
 - [19] A. Haseeb, M. Fazal, M. Jahirul e H. Masjuki, “Compatibility of automotive materials in biodiesel: A review,” *Fuel* 90, vol. 90, pp. 922-931, 2 November 2010.
 - [20] K. A. Sorate e P. V. Bhale, “Impact of biodiesel on fuel system materials durability,” *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 72, pp. 48-57, January 2013.
 - [21] ARPEL/IICA, *Manual de Biocombustíveis*, ARPEL/IICA, 2009.
 - [22] Bioworks Australia Pty Ltd, “BioWorks,” [Online]. Available: <http://www.bioworks.com.au/biodiesel/propofbiodiesel.shtml>. [Acedido em 18 Abril 2013].
 - [23] J. Martins, F. Torres, E. Torres, H. Pimenta e V. Ferreira, “The Use of Biodiesel on the Performance and Emission Characteristics of Diesel Engined Vehicles,” *SAE Technical Paper Series, No 2013-01-1698*, 04 Agosto 2013.
 - [24] A. Senatore, M. Buono, V. Rocco, L. Allocca e S. Vitolo, “Performances and Emissions

- Optimization of a CR Diesel Engine Fuelled with Biodiesel,” *SAE Technical Paper Series, No 2006-01-0235*, April 2006.
- [25] X. Wang, Z. Huang, O. A. Kuti, W. Zhang e K. Nishida, “Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 31, pp. 659-666, 20 Abril 2010.
- [26] J. Xue, “Combustion characteristics, engine performances and emissions of waste edible oil biodiesel in diesel engine,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 350-365, 21 Fevereiro 2013.
- [27] M. Shahabuddin, A. M. Liaquat, H. H. Masjuki, M. A. Kalam e M. Mofijur, “Ignition delay, combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 623-632, 13 Fevereiro 2013.
- [28] R. K. Pandey, A. Rehman e R. M. Sarviya, “Impact of alternative fuel properties on fuel spray behavior and atomization,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 1762-1778, April 2012.
- [29] C. C. Enweremadu e H. L. Rutto, “Combustion, emission and engine performance characteristics of used cooking oil biodiesel—A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2863-2873, 2010.
- [30] B. Tesfa, R. Mishra, C. Zhang, F. Gu e A. D. Ball, “Combustion and performance characteristics of CI (compression ignition) engine running with biodiesel,” *Energy*, vol. 51, pp. 101-115, 2013.
- [31] H. An, W. Yang, A. Maghbouli, J. Li, S. Chou e K. Chua, “Performance, combustion and emission characteristics of biodiesel derived from waste cooking oils,” *Applied Energy*, 2013.
- [32] Z. Fang, Ed., *Biodiesel - Feedstocks, Production and Applications*, InTech, 2012.
- [33] H. J. Kim, S. H. Park e C. S. Lee, “A study on the macroscopic spray behavior and

- atomization characteristics of biodiesel and dimethyl ether sprays under increased ambient pressure,” *Fuel Processing Technology*, vol. 91, pp. 354-363, 2010.
- [34] P.-C. Chen, W.-C. Wang, W. L. Roberts e T. Fang, “Spray and atomization of diesel fuel and its alternatives from a single-hole injector using a common rail fuel injection system,” *Fuel*, vol. 103, pp. 850-861, 2013.
- [35] M. A. Fazal, A. S. M. A. Haseeb e H. H. Masjuki, “Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, p. 1314–1324, 2011.
- [36] Z. Fang, Biodiesel - Feedstocks, Production and Applications, Z. Fang, Ed., InTech, 2012.
- [37] M. E. G. Gomez, R. Howard-Hildige, J. J. Leahy, T. O’reilly e M. M. B. Supple, “Emission and performance characteristics of a 2L Toyota diesel van operating on esterified waste cooking and mineral diesel fuel,” *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 65, pp. 13-20, 2000.
- [38] C. Hasimoglu, M. Ciniviz, I. Ozsert, Y. Icingur, A. Parlak e M. S. Salman, “Performance characteristics of a low heat rejection diesel engine operating with biodiesel,” *Renewable Energy*, vol. 33, p. 1709–1715, 2008.
- [39] M. Lapuerta, O. Armas e J. Rodríguez-Fernández, “Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, p. 198–223, 2008.
- [40] J. Martins, Motores de Combustão Interna (Quarta Edição, Revista e Aumentada), 4ª ed., Publindústria, Edições Técnicas, 2013.
- [41] J. A. Yamin, N. Sakhnini, A. Sakhrieh e M. A. Hamdan, “Environmental and performance study of a 4-Stroke CI engine powered with waste oil biodiesel,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 9, pp. 32-38, 2013.
- [42] Biodieselbr Online Ltda, “biodieselbr.com,” [Online]. Available: <http://www.biodieselbr.com/efeito-estufa/gases/emissoes.htm>. [Acedido em 21 Junho

2013].

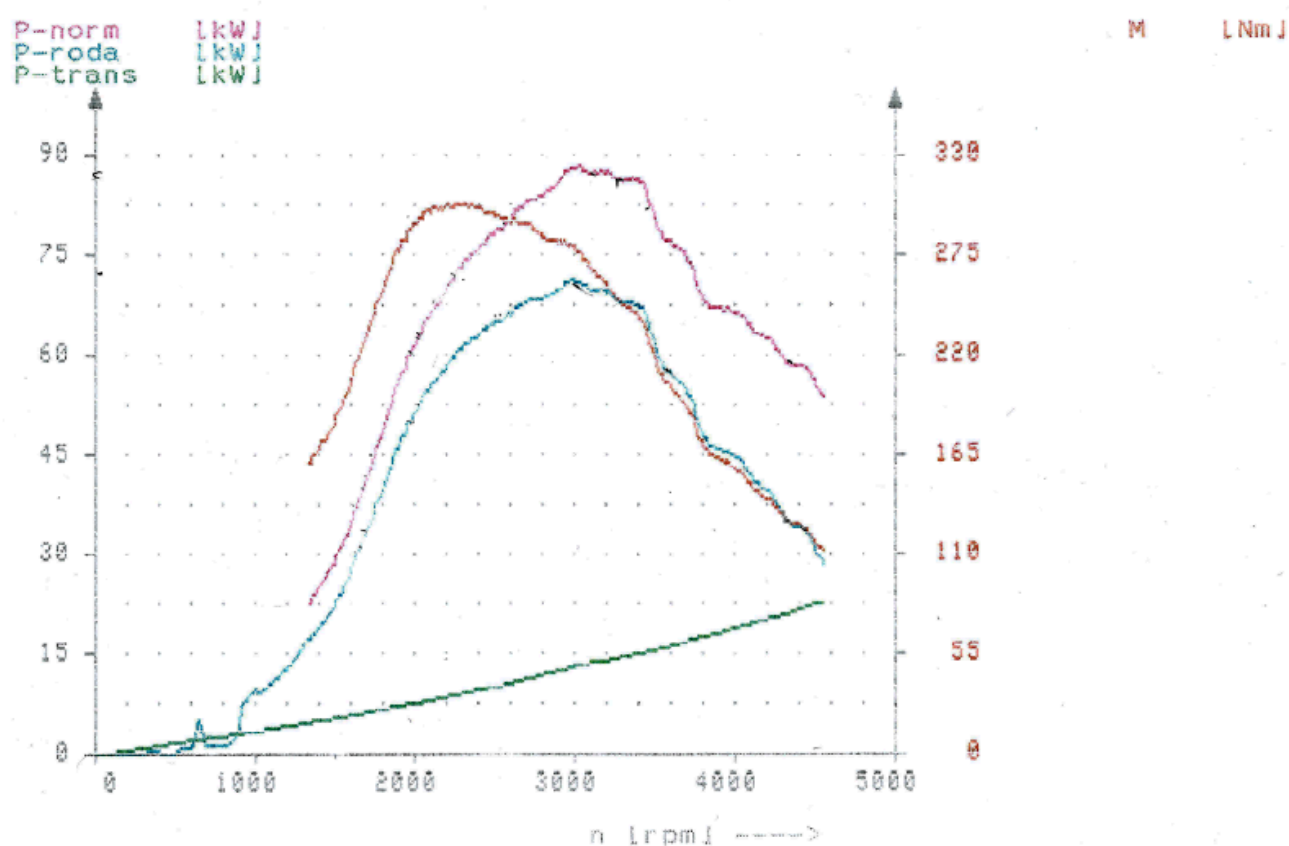
- [43] União Europeia, “Sínteses da legislação da UE,” [Online]. Available: http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/l28186_pt.htm#amen dingact. [Acedido em 24 Junho 2013].
- [44] P.-q. Tan, Z.-y. Hu, D.-m. Lou e Z.-j. Li, “Exhaust emissions from a light-duty diesel engine with jatropha biodiesel fuel,” *Energy*, vol. 39, pp. 356-362, 4 Fevereiro 2012.
- [45] G. Fontaras, G. Karavalakis, M. Kousoulidou, T. Tzamkiozis, L. Ntziachristos, E. Bakeas, S. Stournas e Z. Samaras, “Effects of biodiesel on passenger car fuel consumption, regulated and non-regulated pollutant emissions over legislated and real-world driving cycles,” *Fuel*, vol. 88, p. 1608–1617, 4 Março 2009.
- [46] EPA, “A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions,” 2002.
- [47] M. Gascoigne, Haynes Service and Repair Manual - Vauxhall/Opel Calibra, Haynes Publishing, 1999.
- [48] V. Ravagnani, Manual Técnico Automotivo Doutor-ie - Motronic M 1.5.4, 1ª ed., vol. Módulo 17, Injetronic Tecnologia Automotiva, 2003.
- [49] YANMAR America Corporation, “YANMAR America Corporation,” 2012. [Online]. Available: <http://us.yanmar.com/products/industrial-engines/air-cooled/epa-certified/l-v-series/l100v/>. [Acedido em 07 Outubro 2013].
- [50] Yanmar Co. Ltd., Yanmar Parts Manual - Industrial Diesel Engines - L100 Air Cooled Series, Yanmar, 2008.
- [51] Go Power Systems, *D100 Series Portable Dynamometer - Instalation, Operation and Service Manual*, Froude Hofmann, 2005.
- [52] Go Power Systems, “Go Power Systems,” 2007. [Online]. Available: http://gopowersystems.com/index.php?option=com_content&task=view&id=51&Itemid=60. [Acedido em 07 Outubro 2013].

- [53] P. Dempsey, Troubleshooting and Repairing Diesel Engines, McGraw-Hill, 2008.
- [54] National Renewable Energy Laboratory, "Biodiesel Handling and Use Guide," 2009.
- [55] "BioWorks Australia Pty Ltd," [Online]. Available:
<http://www.bioworks.com.au/biodiesel/propofbiodiesel.shtml>. [Acedido em 18 Abril 2013].
- [56] R. V. Giles, Mecânica dos Fluidos e Hidraulica, McGraw-Hill, 1991.

ANEXOS

ANEXO A – TESTE DE POTÊNCIA REALIZADO AO PEUGEOT 406 COUPÉ 2.2 HDI

ENGENHARIA DO PORTO Tipo veículo : Peugeot 406
PORTO Tipo motor : Gasóleo
LABORATÓRIO AUTOMÓVEL Matrícula : 50-66-RL
Inspector :
Data : 21.04.13 Hora : 11:34
Program-versão V 1.40 Control-versão V 1.05 Measurebox-versão V 1.01



DADOS DA POTÊNCIA =

Potência do motor norm. P-norm : 88,5 kW (120,3 PS) De acordo DIN 70020
Potência do motor P-mot : 84,5 kW (114,9 PS)
Potência nas rodas P-roda : 71,0 kW (96,5 PS)
Potência na transm. P-trans. : 13,5 kW (18,3 PS)
Potência máxima a 114 km/h 3060 rpm

Binário M : 304 Nm
Binário máx. a 85 km/h : 2280 rpm

Velocidade máxima : 171 km/h
RPM máxima : 4580 rpm

Pres. atmosfêr. : 957 mbar Temperat. do ar : 24 °C
Pressão 1 : --- mbar Temp. do óleo : 22 °C
Pressão 2 : --- mbar Temp. gás de esc. : --- °C






ANEXO B – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO MOTOR OPEL C20NE [47]

Chapter 2 Part A: SOHC engine procedures

Contents

Camshaft front oil seal - removal and refitting	13	Engine oil and filter - renewal	See Chapter 1
Camshaft housing and camshaft - general	15	Engine dismantling and reassembly - general	10
Camshaft housing and camshaft - dismantling, inspection and reassembly	16	Examination and renovation - general	35
Camshaft rear oil seal - removal and refitting	14	Flexplate (automatic transmission) - removal and refitting	24
Camshafts, "undersize" - general	17	Flywheel - removal, inspection and refitting	23
Compression test - description	3	General description	1
Crankcase ventilation system - description and maintenance	2	Hydraulic valve lifters - inspection	22
Crankshaft and bearings - examination	33	Initial start-up after major overhaul or repair	36
Crankshaft and bearings - removal and refitting	32	Major operations possible with the engine in the vehicle	4
Crankshaft front oil seal - renewal	25	Major operations requiring engine removal	5
Crankshaft rear oil seal - renewal	26	Method of engine removal	6
Cylinder block and bores - examination and renovation	34	Oil pump - dismantling, inspection and reassembly	29
Cylinder head - dismantling and reassembly	20	Oil pump - removal and refitting	28
Cylinder head - inspection and renovation	21	Pistons and connecting rods - examination and renovation	31
Cylinder head - removal and refitting (engine in vehicle)	18	Pistons and connecting rods - removal and refitting	30
Cylinder head - removal and refitting (engine removed)	19	Sump - removal and refitting	27
Engine - removal and refitting (leaving transmission in car)	7	Timing belt and sprockets (without automatic tensioner) - removal, refitting and adjustment	11
Engine and transmission mountings - renewal	9	Timing belt, sprockets and tensioner - removal, refitting and adjustment	12
Engine and transmission - removal, separation, reconnection and refitting	8		

Degrees of difficulty

Easy, suitable for novice with little experience		Fairly easy, suitable for beginner with some experience		Fairly difficult, suitable for competent DIY mechanic		Difficult, suitable for experienced DIY mechanic		Very difficult, suitable for expert DIY or professional	
--	---	---	---	---	---	--	---	---	---

Specifications

General

Type (all models)	Four-cylinder, in-line, water-cooled, transversely mounted at front of vehicle. Single belt-driven overhead camshaft, acting on hydraulic valve lifters
Manufacturer's engine code:	
C20 NE	2.0 litre (1998 cc) + catalyst
Pistons:	
Bore	86.0 mm
Stroke	86.0 mm
Compression ratio	9.2 : 1
Maximum power	85 kW (115 bhp) at 5200 rpm
Maximum torque	170 Nm at 2600 rpm
Firing order	1-3-4-2 (No 1 cylinder at timing belt end)

Cylinder block

Material	Cast iron
Maximum permissible bore out-of round	0.013 mm
Maximum permissible bore taper	0.013 mm
Maximum permissible rebore oversize	0.5 mm

Crankshaft and bearings

Number of main bearings	5
Main bearing journal diameter (mm):	
Standard	57.974 to 57.995
0.25 mm undersize	57.732 to 57.745
0.50 mm undersize	57.482 to 57.495
Main bearing shell colour codes:	
Standard	Brown/green/white
0.25 mm undersize	Brown/blue and Green/blue
0.50 mm undersize	Brown/white and Green/white
Centre (thrust) main bearing journal width (mm):	
Standard	25.950 to 26.002
0.25 mm undersize	26.150 to 26.202
0.50 mm undersize	26.350 to 26.402
Big-end bearing journal diameter (mm):	
Standard	48.970 to 48.988
0.25 mm undersize	48.720 to 48.738
0.50 mm undersize	48.470 to 48.488
Big-end bearing shell colour codes (all models):	
Standard	None
0.25 mm undersize	Blue
0.50 mm undersize	White
Main and big-end bearing journal out-of-round (all models)	0.04 mm maximum
Main bearing permissible movement (mm)	0.015 to 0.040
Big-end bearing permissible movement (mm)	0.006 to 0.031
Crankshaft endfloat (mm)	0.050 to 0.152
Connecting rod endfloat (mm)	0.07 to 0.24

Piston and cylinder bores (Ø in mm)

	Bore diameter	Piston diameter	ID mark
Production size 1	85.98 mm	85.96 mm	8
Production size 2	85.99 mm	85.97 mm	99
	86.00 mm	85.98 mm	00
	86.01 mm	85.99 mm	01
	86.02 mm	86.00 mm	02
0.5 mm oversize	86.47 mm	86.45 mm	7 + 0.5
Piston clearance in bore (mm)	0.02 to 0.04		

Piston rings

Number (per piston)	2 compression, 1 oil control
Ring end gap (mm):	
Compression	0.3 to 0.5
Oil control (top and bottom sections)	0.4 to 1.4
Ring gap offset (to gap of adjacent ring)*	180°

* See Section 31 for oil control ring sections

Cylinder head

Material	Light alloy
Maximum permissible distortion of sealing face	0.025 mm
Height of cylinder head (sealing surface to sealing surface)	96.00 ± 0.25 mm
Valve seat width (mm):	
Inlet	1.0 to 1.5
Exhaust	1.7 to 2.2

Camshaft

Camshaft bearing journal diameter:	Normal (mm)	0.1 mm undersize
No 1	42.455 to 42.470	42.355 to 42.370
No 2	42.705 to 42.720	42.605 to 42.620
No 3	42.955 to 42.970	42.855 to 42.870
No 4	43.205 to 43.220	43.105 to 43.120
No 5	43.455 to 43.470	43.355 to 43.370
Camshaft bearing diameter in housing:		
No 1	42.500 to 42.525	42.400 to 42.425
No 2	42.750 to 42.775	42.650 to 42.675
No 3	43.000 to 43.025	42.900 to 42.925
No 4	43.250 to 43.275	43.150 to 43.175
No 5	43.500 to 43.525	43.400 to 43.425
Cam lift (mm) (inlet and exhaust)	6.67	
Maximum permissible radial run-out (mm)	0.04	
Endfloat (mm)	0.09 to 0.21	

Timing belt (engines without automatic tension roller)

Tension, using Vauxhall gauge KM-51 0-A (see Section 11):

New belt, cold	4.5
New belt, warm	7.5
Used belt, cold	2.5
Used belt, warm	7.0

Valves and guides

	Inlet	Exhaust
Overall length - production (mm)	104.2	104.0
Overall length - service (mm)	103.8	103.6
Head diameter (mm)	41.8	36.5
Stem diameter (mm):		
Standard	6.998 to 7.012	6.978 to 6.992
0.075 mm oversize	7.073 to 7.087	7.053 to 7.067
0.150 mm oversize	7.148 to 7.162	7.128 to 7.142
0.250 mm oversize	7.248 to 7.262	7.228 to 7.242
Valve guide bore (mm):		
Standard	7.030 to 7.050	
0.075 mm oversize	7.105 to 7.125	
0.150 mm oversize	7.180 to 7.200	
0.250 mm oversize	7.280 to 7.300	
Valve clearance in guide (mm):		
Inlet	0.018 to 0.052	
Exhaust	0.038 to 0.072	
Valve seat angle	44°	
Valve clearances	Automatic adjustment by hydraulic lifters	

Flywheel

Maximum permissible lateral run-out of starter ring gear	0.5 mm
Refinishing limit - maximum depth of material that may be removed from clutch friction surface	0.3 mm

Lubrication system

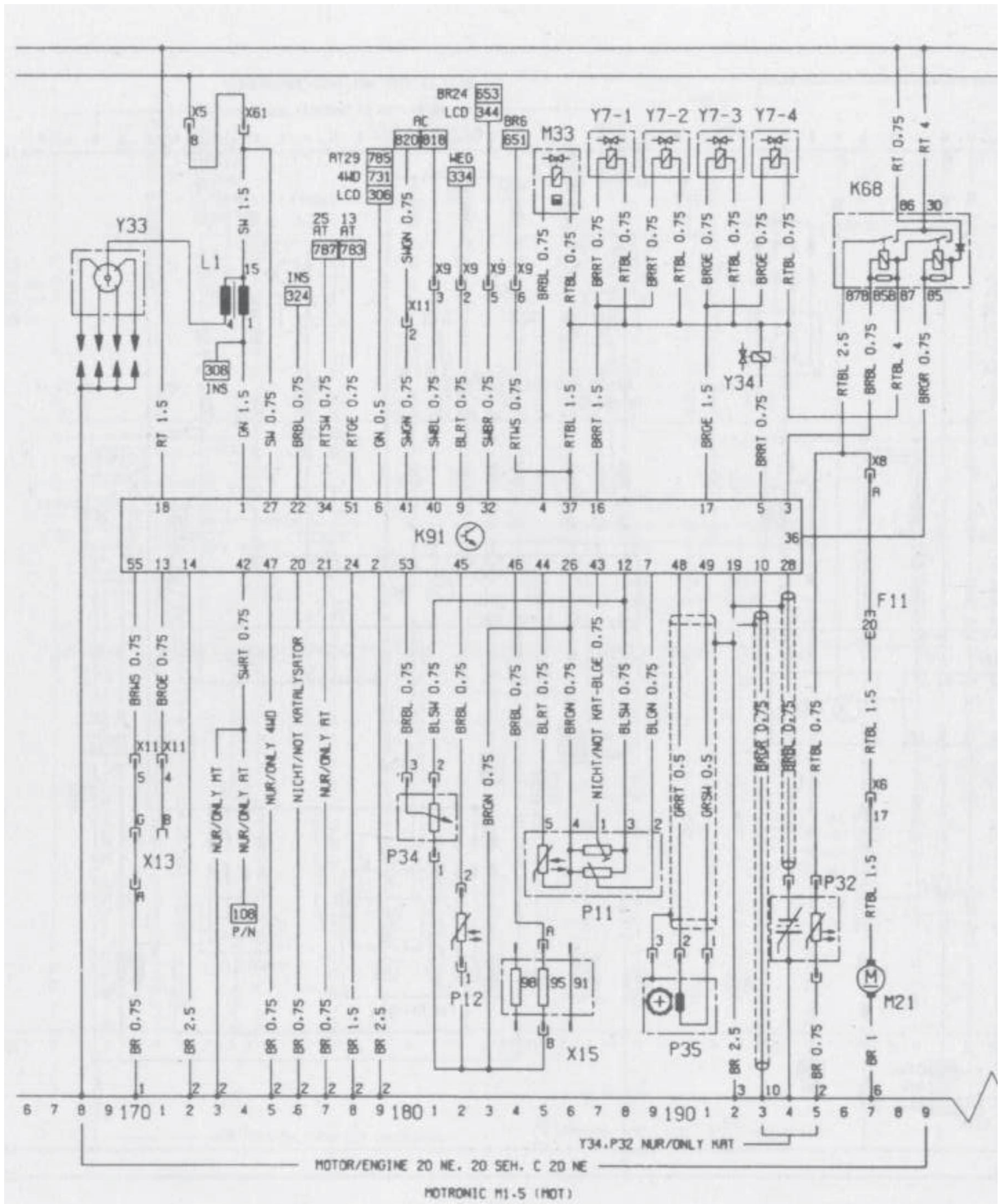
Lubricant type/specification	See "Lubricants and fluids"
Lubricant capacity	See Chapter 1 Specifications
Oil pump clearances:	
Inner-to-outer gear teeth clearance (backlash)	0.0 to 0.2 mm
Gear-to-housing clearance (endfloat)	0.03 to 0.10 mm
Oil pressure at idle (engine warm)	1.5 bar (21.8 lbf/in ²)

Torque wrench settings

	Nm	lbf ft
Note: Use new bolts where asterisked (*). The torque settings stated for the cylinder head are only applicable to latest specification bolts, available from Vauxhall. Earlier type or alternative make, head bolts may require different torques. Consult your supplier.		
Air inlet pre-heat to exhaust manifold	8	6
Alternator and inlet manifold to brackets	18	13
Alternator to bracket:		
M8	30	22
M10	40	30
Alternator to shackle	25	18
Big-end bearing cap: *		
Stage 1	35	26
Stage 2	Angle tighten by 45°	
Stage 3	Angle tighten by 15°	
Camshaft housing cover to housing	8	6
Camshaft sprocket to camshaft	45	33
Camshaft thrust plate	8	6
Coolant outlet to thermostat housing	8	6
Coolant pump to cylinder block (M8)	25	18
Crankshaft sensor wheel	13	10
Cylinder head to cylinder block: *		
Stage 1	25	18
Stage 2	Angle tighten by 90°	
Stage 3	Angle tighten by 90°	
Stage 4	Angle tighten by 90°	
Drivebelt pulley to timing belt drive sprocket	20	15
Drivebelt (ribbed) tensioner to cylinder block	20	15
Drivebelt (ribbed) tensioner to support	18	13

Torque wrench settings	Nm	lbf ft
Engine mounting, left:		
Bracket to transmission	60	44
Mounting bush to bracket	60	44
Mounting bush to bodywork * (use locking compound)	65	48
Engine mounting, right:		
Bracket to engine block	60	44
Damping bush to bracket	35	26
Damping bush to bodywork * (use locking compound)	65	48
Engine mounting, rear:		
Bracket to transmission (use new locking plates)	60	44
Damping bush to bracket	45	33
Damping bush to front subframe	40	30
Exhaust manifold to cylinder head	22	16
Exhaust pipe to manifold	25	18
Flexplate to crankshaft	60	44
Flywheel to crankshaft: *		
Stage 1	65	48
Stage 2	Angle tighten by 30°	
Stage 3	Angle tighten by 15°	
Front timing belt cover to rear cover	4	3
Fuel pump to camshaft housing	18	13
Guide sleeve, release bearing to transmission	22	16
Heat shield sleeves to cylinder head	30	22
Inlet manifold to cylinder head	22	16
Main bearing cap: *		
Stage 1	50	37
Stage 2	Angle tighten by 45°	
Stage 3	Angle tighten by 15°	
Oil filter to oil pump/cylinder block	6	4
Oil pick-up pipe bracket to cylinder block	6	4
Oil pick-up pipe to oil pump	8	6
Oil pipes to radiator	22	16
Oil pressure switch to oil pump	40	30
Oil pressure relief valve to oil pump	30	22
Oil pump cover to oil pump	6	4
Oil pump to cylinder block	6	4
Oxygen sensor to exhaust manifold	30	22
Power steering pump bracket to support	18	13
Power steering pump to support	25	18
Shackle to alternator	25	18
Spark plugs	25	18
Starter to cylinder block:		
M10	45	33
M12	60	44
Sump	15	11
Sump drain plug	55	41
Temperature sender to cylinder head	20	15
Thermostat housing	15	11
Timing belt cover to oil pump/camshaft housing	6	4
Timing belt drive sprocket to crankshaft:		
Stage 1	130	96
Stage 2	Angle tighten by between 40° to 50°	
Transmission to engine:		
M10	45	33
M12	60	44

ANEXO C – ESQUEMA ELÉTRICO DO MOTOR C20NE [47]



ANEXO D – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO MOTOR YANMAR

L100 [49]

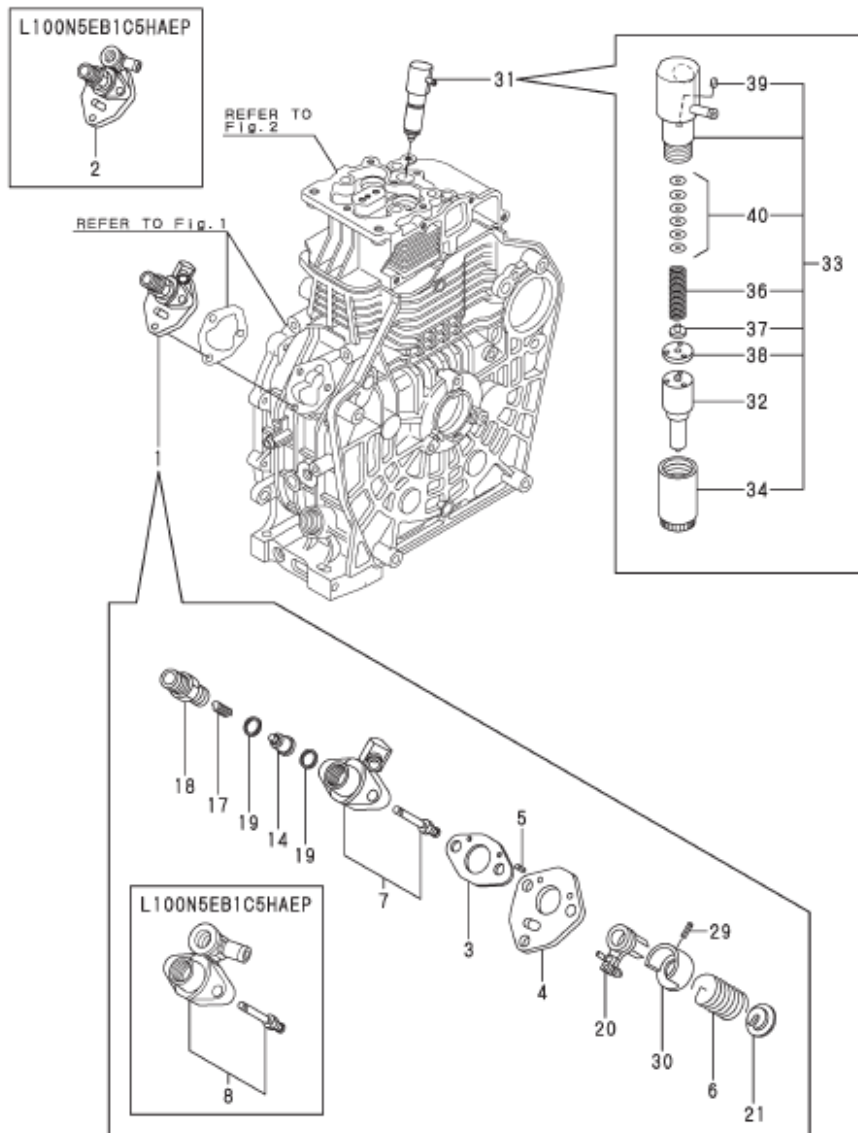
Engine Specifications

Engine Model			L48N		L70N		L100N	
Type			4 stroke, vertical cylinder, air cooled diesel engine					
No. of Cylinders			1					
Bore x Stroke		mm	Φ70 x 57		Φ78 x 57		Φ88 x 75	
Displacement		liter	0.219		0.320		0.435	
Continuous Rated Output	Engine Speed	rpm(min ⁻¹)	3600	3000	3600	3000	3600	3000
	Output	kW [PS]	3.1 [4.2]	2.6 [3.6]	4.4 [6.0]	4.1 [5.6]	6.6 [9.0]	5.7 [7.7]
Maximum Rated Output	Engine Speed	rpm(min ⁻¹)	3600	3000	3600	3000	3600	3000
	Output / Eng. Speed	kW [PS]	3.5 [4.7]	3.1 [4.2]	4.9 [6.7]	4.5 [6.1]	7.4 [10.0]	6.5 [8.8]
High Idling		rpm(min ⁻¹)	3800±30	3175±30	3800±30	3175±30	3800±30	3175±30
Engine Weight (Dry)	Electric Starter	kg	32.0		41.0		53.5	
	Recoil Start	kg	27.0		36.0		48.5	
Cooling System			Forced Air by Flywheel Fan					
Lubricating System			Forced lubrication with Trochoid Pump					
Starting System			Electric start / Recoil start					
Dimension	Overall Length (L)	mm	332		378		412	
	Overall Width (W)	mm	384		422		471	
	Overall Height (H)	mm	417		453		494	
Lubricating System	Dispsstick Upper Limit	liter	0.80		1.05		1.0	
	Dispsstick Lower Limit	liter	0.55		0.65		1.0	
Fuel oil tank capacity		liter	2.4		3.3		5.4	

Accessories

Engine Model		L48N			L70N			L100N		
		General	Generator	Pump	General	Generator	Pump	General	Generator	Pump
Fuel system	Fuel tank (2.4 liter)	○	○	○						
	Fuel tank (3.3 liter)				○	○	○			
	Fuel tank (5.4 liter)							○	○	○
	w/o Fuel tank	△	△	△	△	△	△	△	△	△
Starting system	Starting motor (w/Recoil starter)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Recoil starter	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	Key switch	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	w/o Key switch	△	△	△	△	△	△	△	△	△
Electric system	Charging dynamo (12V-15A)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Charging dynamo (12V-1A)	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	w/o Charging dynamo	△	△	△	△	△	△	△	△	△
PTO system	Straight (E-D)	○			○			○		
	Straight (D)	△			△			△		
	Taper (E-DG)		○			○			○	
	Taper (DG)		△			△			△	
	Taper (E-D)		△			△			△	
	Thread (E-DP)			○			○			○
	Thread (DP)			△			△			△
Speed control device	General use (by remote & hand)	○	△	△	○	△	△	○	△	△
	Constant speed type (by hand)	△	○	△	△	○	△	△	○	△
	Friction plate type (by hand)	△	△	○	△	△	○	△	△	○
Maintenance tools		○	○	○	○	○	○	○	○	○

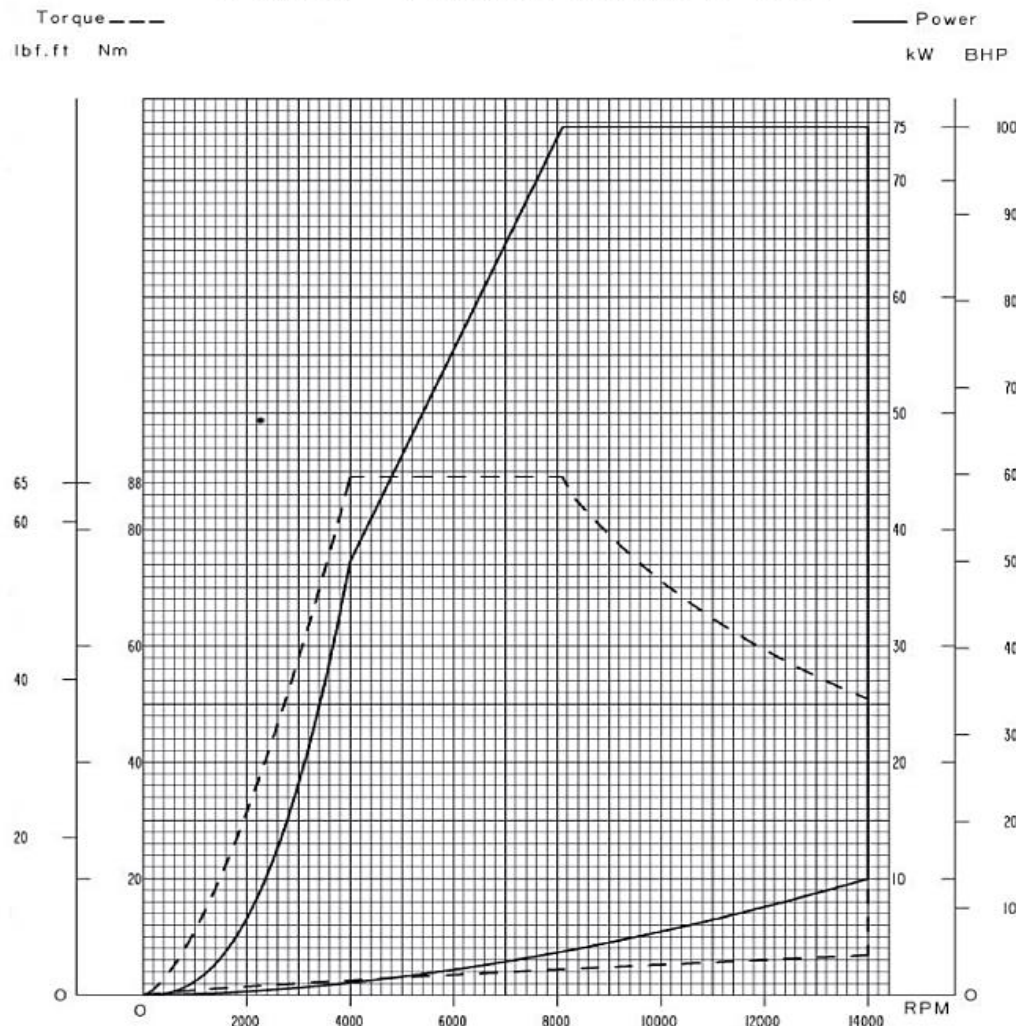
ANEXO E – EQUEMA DE MONTAGEM DA BOMBA INJETORA DO MOTOR YANMAR L100 [50]



REF.	LEV.	PARTS NO.	DESCRIPTION	QTY						I	R
				(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)		
1	1	714320-51130	PUMP ASSY, F.INJECT.	1							
2	1	714320-51150	PUMP ASSY, F.INJECT.		1						
3	2	114299-51020	GASKET, PUMP BODY	1	1						
4	2	114299-51080	PLATE	1	1						
5	2	114299-51090	PIN, 2.0A X 8	2	2						
6	2	114299-51160	SPRING, PLUNGER	1	1						
7	2	114320-51200	BODY ASSY, PUMP	1							
8	2	114320-51230	BODY ASSY, FOP		1						
14	2	114699-51300	VALVE ASSY, DELIVERY	1	1						
17	2	114299-51330	SPRING, VALVE	1	1						
18	2	114299-51340	HOLDER, DELIVERY	1	1						
19	2	114299-51350	PACKING, DELIVERY	2	2						
20	2	114299-51600	LEVER, CONTROL	1	1						
21	2	114299-51620	SEAT ASSY (B, SPRING	1	1						
29	2	114299-51630	PIN, 2.5A X 8	1	1						
30	2	114299-51640	SEAT, SPRING	1	1						
31	1	714320-53100	FUEL INJECTOR	1	1						
32	2	114320-53000	NOZZLE ASSY	1	1						
33	2	114210-53100	HOLDER ASSY,NOZZLE	1	1						
34	3	114210-53080	NUT,NOZZLE	1	1						
36	3	114210-53120	SPRING,NOZZLE	1	1						
37	3	114210-53130	SEAT,SPRING	1	1						
38	3	114210-53140	SPACER ASSY,VALVE	1	1						
39	3	114210-53330	PIN	1	1						
40	3	114210-53400	SHIM SET	1	1						

ANEXO F – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO FREIO HIDRÁULICO GO POWER SYSTEMS D-100 SERIES [52]

Power - Torque Curve D-100



Specifications:

- Type of absorption: Water brake
- Construction: High strength aluminum alloy
- Shaft: Hardened stainless steel
- Bearings: Greased ball & roller
- Operating range: 14,000 rpm continuous
- Rotation direction: Clockwise or counter clockwise
- Torque transducer: Strain gauge load cell
- Speed pickup: 60 tooth gear with inductive sensor

Water requirements:

- Inlet: 1/2" (12.7mm) line, minimum 10 GPM (US) (0.044 liters/s) @ 35 PSI (240 kPa)
- Outlet: 1/2" (12.7mm) gravity drain to atmosphere
- Weight: 48lbs (22kg)
- Dimensions: 8" (203mm) x 11" (279mm) x 11" (279mm)

ANEXO G – TESTES EFETUADOS A CARGA MÁXIMA

Tabela G.1 - Teste a carga máxima efetuado com diesel.

Teste a carga máxima - Gasóleo				
Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]	Consumo Específico [g/kWh]	Rendimento [%]
3646	1,50	0,57	333,65	25,36%
3518	13,00	4,79	310,38	27,27%
3433	15,41	5,54	290,85	29,10%
3337	16,51	5,77	294,60	28,73%
3235	16,99	5,76	314,12	26,94%
3153	18,82	6,21	311,37	27,18%
3044	20,85	6,65	309,69	27,33%
2953	24,25	7,50	278,27	30,41%
2837	24,68	7,33	275,00	30,77%
2740	24,34	6,98	267,89	31,59%
2643	24,17	6,69	264,80	31,96%
2599	24,62	6,70	258,68	32,71%
2553	25,06	6,70	274,27	30,85%
2464	25,36	6,55	315,86	26,79%
2373	25,75	6,40	331,38	25,54%
2250	25,19	5,93	362,79	23,33%
2120	23,71	5,26	413,33	20,47%
2012	23,52	4,96	441,70	19,16%
1862	23,65	4,61	477,46	17,72%
1665	24,34	4,24	521,27	16,23%
1535	24,19	3,89	571,31	14,81%
1439	23,84	3,59	591,54	14,31%
Rendimento médio:				25,39%

Tabela G.2 - Teste a carga máxima efetuado com B25

Teste a carga máxima - B25				
Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]	Consumo Específico [g/kWh]	Rendimento [%]
3569	3,00	1,12	745,12	11,73%
3492	7,46	2,73	473,67	18,45%
3136	17,51	5,75	404,75	21,60%
3026	21,52	6,82	356,42	24,53%
2975	22,24	6,93	373,16	23,43%
2856	23,42	7,00	362,64	24,10%
2733	23,30	6,67	356,94	24,49%
2646	24,02	6,65	337,63	25,89%
2546	25,05	6,68	323,87	26,99%
2540	24,76	6,59	291,49	29,99%
2448	26,05	6,68	211,05	41,42%
2369	26,21	6,50	226,23	38,64%
2263	26,32	6,24	193,59	45,16%
2189	25,80	5,91	201,02	43,49%
2068	25,14	5,45	209,85	41,66%
1907	24,82	4,96	244,29	35,78%
1807	24,64	4,66	272,99	32,02%
1675	24,52	4,30	301,69	28,98%
1556	24,17	3,94	328,20	26,63%
1527	24,12	3,86	354,72	24,64%
1464	23,83	3,65	352,71	24,78%
1455	23,58	3,59	350,71	24,93%
Rendimento médio:				29,06%

Tabela G.3 - Teste a carga máxima efetuado com B50.

Teste a carga máxima - B50				
Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]	Consumo Específico [g/kWh]	Rendimento [%]
3339	1,59	0,56	902,17	10,01%
3269	3,41	1,17	799,54	11,30%
3232	8,15	2,76	594,28	15,20%
3149	17,80	5,87	361,71	24,97%
3046	20,40	6,51	353,86	25,52%
2914	21,94	6,69	343,12	26,32%
2863	23,10	6,93	319,51	28,27%
2717	23,60	6,71	299,54	30,15%
2605	23,18	6,32	276,94	32,61%
2542	24,80	6,60	313,26	28,83%
2466	26,14	6,75	299,78	30,13%
2364	26,54	6,57	211,23	42,76%
2280	26,41	6,31	219,44	41,16%
2245	26,17	6,15	227,65	39,68%
2132	25,90	5,78	248,09	36,41%
1987	25,28	5,26	248,51	36,34%
1942	25,30	5,15	275,12	32,83%
1780	25,09	4,68	301,73	29,93%
1658	24,85	4,31	328,63	27,48%
1553	24,31	3,95	355,54	25,40%
1459	21,99	3,36	395,16	22,86%
Rendimento médio:				28,48%

Tabela G.4 - Teste a carga máxima efetuado com B75.

Teste a carga máxima - B75				
Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]	Consumo Específico [g/kWh]	Rendimento [%]
3358	1,50	0,53	812,60	11,49%
3315	2,83	0,98	611,35	15,27%
3251	5,28	1,80	505,14	18,48%
3053	13,68	4,37	417,98	22,33%
2948	18,83	5,81	332,89	28,04%
2805	21,00	6,17	313,14	29,81%
2744	21,84	6,28	343,03	27,21%
2645	21,71	6,01	356,18	26,21%
2540	23,46	6,24	332,88	28,04%
2460	24,29	6,26	279,74	33,37%
2277	23,94	5,71	286,98	32,53%
2112	23,88	5,28	285,97	32,64%
1906	22,86	4,56	330,18	28,27%
1674	22,44	3,93	343,82	27,15%
1541	22,99	3,71	357,46	26,12%
1471	22,83	3,52	380,45	24,54%
Rendimento médio:				25,72%

Tabela G.5 - Teste a carga máxima efetuado com B100.

Teste a carga máxima - B100				
Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]	Consumo Específico [g/kWh]	Rendimento [%]
3638	4,20	1,60	330,33	29,22%
3558	14,88	5,54	297,27	32,47%
3430	19,08	6,85	281,63	34,27%
3252	21,36	7,27	291,02	33,16%
2946	22,20	6,85	314,68	30,67%
2851	22,42	6,69	316,75	30,47%
2743	21,59	6,20	337,46	28,60%
2658	21,63	6,02	345,49	27,94%
2600	23,02	6,27	339,33	28,44%
2584	22,85	6,18	333,16	28,97%
2554	23,61	6,31	297,75	32,42%
2462	24,98	6,44	304,97	31,65%
2352	24,67	6,08	312,25	30,91%
2262	22,90	5,43	340,52	28,34%
2139	22,67	5,08	351,50	27,46%
2031	22,67	4,82	359,54	26,84%
1878	22,76	4,48	373,88	25,81%
1665	23,11	4,03	398,14	24,24%
1527	22,84	3,65	417,68	23,11%
1441	22,54	3,40	437,22	22,07%
Rendimento médio:				28,85%

ANEXO H – TESTES EFETUADOS A CARGAS PARCIAIS

Tabela H.1 - Testes efetuados com gasóleo e B100, a carga máxima.

Carga Total (Posição do acelerador a 52ª)					
Gasóleo			B100		
Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]	Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]
1478	22,91	3,55	1479	22,61	3,50
1487	22,76	3,54	1515	22,61	3,59
1522	23,35	3,72	1568	22,76	3,74
1854	23,79	4,62	1700	22,91	4,08
2026	24,08	5,11	1908	23,05	4,61
2194	24,08	5,53	2030	23,20	4,93
2492	23,94	6,25	2100	23,20	5,10
2548	23,05	6,15	2233	23,35	5,46
2674	22,17	6,21	2391	23,79	5,96
2720	21,88	6,23	2424	23,35	5,93
2964	21,44	6,65	2499	22,76	5,96
3220	20,85	7,03	2516	20,12	5,30
3411	20,56	7,34	2561	18,51	4,96
3568	19,53	7,30	2615	16,01	4,38
3627	17,18	6,53	2765	13,08	3,79
3694	8,82	3,41	3003	14,54	4,57
3722	5,00	1,95	3120	8,82	2,88
			3192	7,65	2,56
			3370	5,74	2,02

Tabela H.2 - Testes efetuados com gasóleo e B100, a 3/4 de carga.

¾ de Carga (Posição do acelerador a 44º)					
Gasóleo			B100		
Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]	Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]
1492	23,05	3,60	1483	23,20	3,60
1493	23,35	3,65	1495	23,50	3,68
1500	23,79	3,74	1541	23,94	3,86
1568	24,52	4,03	1687	24,82	4,38
1631	24,82	4,24	1784	24,23	4,53
1744	25,11	4,59	1820	22,91	4,37
1826	25,55	4,89	1885	21,59	4,26
1981	22,76	4,72	2016	19,97	4,22
2122	21,15	4,70	2129	18,21	4,06
2214	21,29	4,94	2190	15,42	3,54
2382	22,17	5,53	2399	14,54	3,65
2461	21,15	5,45	2456	13,37	3,44
2506	21,44	5,63	2769	12,93	3,75
2527	21,88	5,79	2812	10,14	2,99
2674	21,59	6,04	2883	7,65	2,31
2704	22,03	6,24	2922	5,74	1,76
2833	22,32	6,62			
2912	22,17	6,76			
3080	21,29	6,87			
3182	18,07	6,02			
3296	4,42	1,52			

Tabela H.3 - Testes efetuados com gasóleo e B100, a 1/2 de carga.

½ de Carga (Posição do acelerador a 36°)					
Gasóleo			B100		
Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]	Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]
1261	15,72	2,08	1166	13,37	1,63
1319	15,86	2,19	1433	13,66	2,05
1476	16,30	2,52	1592	14,54	2,42
1753	18,51	3,40	1758	16,01	2,95
1939	18,95	3,85	1887	16,45	3,25
2083	21,44	4,68	1973	17,48	3,61
2127	21,73	4,84	2085	17,18	3,75
2278	21,88	5,22	2276	12,78	3,05
2340	21,15	5,18	2380	13,08	3,26
2424	21,59	5,48	2440	11,31	2,89
2592	20,85	5,66	2560	12,49	3,35
2739	19,83	5,69	2686	9,55	2,69
2750	17,48	5,03	2733	8,67	2,48
2767	14,40	4,17	2797	7,35	2,15
2807	9,55	2,81	2804	3,54	1,04
2876	4,27	1,29			

Tabela H.4 - Testes efetuados com gasóleo e B100, a 1/4 de carga.

1/4 de Carga (Posição do acelerador a 28°)					
Gasóleo			B100		
Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]	Vel. Rotação [rpm]	Binário [N.m]	Potência [kW]
1185	14,98	1,86	1099	12,93	1,49
1229	15,28	1,97	1180	12,78	1,58
1389	15,13	2,20	1320	13,52	1,87
1600	16,01	2,68	1534	14,54	2,34
1979	22,03	4,56	1678	16,01	2,81
1987	21,15	4,40	1810	16,01	3,03
2076	22,47	4,88	1935	16,74	3,39
2108	18,21	4,02	2056	13,08	2,82
2112	17,48	3,87	2088	8,82	1,93
2123	14,54	3,23	2108	8,23	1,82
2136	12,63	2,83	2125	6,47	1,44
2156	9,85	2,22	2159	4,12	0,93
2167	9,26	2,10	2168	2,21	0,50
2185	7,65	1,75			
2209	6,32	1,46			
2226	5,15	1,20			
2246	2,95	0,69			

ANEXO I – TEMPERATURAS REGISTRADAS NOS TESTES EFETUADOS A CARGA MÁXIMA

Tabela I.1 - Temperaturas registradas no teste com gasóleo.

Temperaturas – Gasóleo					
Vel. Rot. [rpm]	Temp. Culassa [°C]	Temp. Ambiente [°C]	Temp. Óleo [°C]	Temp. Ar Admissão [°C]	Temp. Gases Escape [°C]
3646	74,83	23,45	86,39	50,50	522,10
3518	82,67	23,47	91,53	50,74	574,74
3457	82,67	23,47	91,53	50,74	574,74
3433	85,21	23,48	93,97	50,87	584,35
3385	83,29	23,47	92,41	50,69	579,94
3337	87,11	23,48	95,15	50,96	585,95
3235	87,74	23,49	96,36	50,48	592,86
3153	89,73	23,50	98,09	50,85	596,70
3044	92,35	23,52	101,10	50,22	595,56
2953	89,68	23,55	103,66	50,12	593,65
2837	91,78	23,59	105,64	50,36	589,53
2740	89,62	23,64	108,14	50,19	587,99
2643	87,99	23,69	108,76	50,08	599,38
2599	87,76	23,73	109,71	49,97	611,06
2553	88,51	23,82	112,82	50,05	617,11
2464	91,95	23,91	113,73	49,82	542,66
2373	91,28	23,93	113,80	49,84	537,66
2250	90,98	23,94	113,99	49,70	535,43
2120	91,17	23,95	114,22	49,66	534,75
2012	90,99	23,96	114,35	49,66	534,53
1862	90,37	23,97	114,42	49,63	533,95
1665	89,96	23,97	114,55	49,80	526,78
1535	89,79	23,98	114,56	49,84	479,43
1439	96,52	23,99	114,92	50,65	368,29

Tabela I.2 - Temperaturas registradas no teste com B25.

Temperaturas – B25					
Vel. Rot. [rpm]	Temp. Culassa [°C]	Temp. Ambiente [°C]	Temp. Óleo [°C]	Temp. Ar Admissão [°C]	Temp. Gases Escape [°C]
3638	64,42	26,10	95,95	51,97	250,85
3618	64,57	26,10	96,41	51,60	321,37
3571	64,54	26,10	96,30	52,18	305,84
3569	64,76	26,10	96,74	51,60	335,64
3569	65,39	26,11	97,59	52,30	346,80
3557	67,02	26,11	100,15	52,51	300,37
3524	66,04	26,11	98,30	52,64	336,36
3492	67,40	26,12	99,37	52,07	290,70
3442	65,90	26,11	98,12	52,58	328,92
3442	65,02	26,10	97,24	51,80	352,06
3433	66,62	26,11	99,86	52,45	367,79
3429	66,11	26,11	98,41	52,74	343,01
3362	66,26	26,11	98,85	51,93	337,45
3216	66,31	26,11	99,56	52,19	365,03
3042	69,27	26,13	102,35	52,67	422,13
3026	69,77	26,14	103,35	52,41	523,26
2975	70,43	26,14	103,58	52,69	529,68
2964	69,07	26,14	102,70	51,82	472,52
2856	70,99	26,14	103,60	52,87	536,69
2743	72,13	26,15	103,61	52,73	546,02
2646	72,68	26,15	103,96	52,57	550,25
2546	73,04	26,15	104,73	52,32	586,80
2453	74,81	26,16	105,80	51,76	611,47
2369	77,39	26,17	105,04	52,07	589,38
2189	76,53	26,17	104,71	51,92	558,68
1907	77,25	26,18	104,69	51,73	538,39
1675	77,53	26,18	104,76	51,79	535,34
1527	78,00	26,18	105,04	52,02	529,47
1455	78,55	26,19	106,08	51,66	485,46

Tabela I.3 - Temperaturas registradas no teste com B50.

Temperaturas – B50					
Vel. Rot. [rpm]	Temp. Culassa [°C]	Temp. Ambiente [°C]	Temp. Óleo [°C]	Temp. Ar Admissão [°C]	Temp. Gases Escape [°C]
3269	67,85	26,58	104,51	51,94	305,86
3224	67,86	26,58	104,58	51,69	252,87
3028	67,78	26,58	104,23	51,91	316,53
3017	67,78	26,58	104,53	51,92	299,61
2963	69,51	26,58	105,38	53,01	374,94
2952	67,92	26,58	104,94	51,87	331,21
2919	68,40	26,58	104,60	52,72	357,33
2914	72,25	26,59	107,10	53,87	514,09
2893	68,13	26,58	104,94	51,96	343,57
2893	68,61	26,58	104,60	53,17	369,84
2863	72,72	26,59	107,29	53,46	519,61
2855	70,35	26,59	105,82	53,36	388,76
2837	71,80	26,59	106,80	52,96	478,07
2827	70,98	26,59	106,25	53,21	412,30
2767	71,12	26,59	106,53	52,90	440,77
2717	73,32	26,59	107,38	53,13	533,17
2542	74,58	26,60	108,35	52,87	572,64
2466	77,45	26,60	109,43	52,50	607,15
2364	79,08	26,60	108,85	52,64	584,50
2245	78,59	26,61	108,75	52,50	558,82
2132	77,48	26,61	108,80	52,24	549,34
1987	76,42	26,61	108,83	52,06	539,81
1780	75,94	26,61	108,71	52,27	533,11
1553	76,41	26,61	108,74	52,13	528,50
1459	77,98	26,61	109,94	52,33	469,62

Tabela I.4 - Temperaturas registradas no teste com B75.

Temperaturas – B75					
Vel. Rot. [rpm]	Temp. Culassa [°C]	Temp. Ambiente [°C]	Temp. Óleo [°C]	Temp. Ar Admissão [°C]	Temp. Gases Escape [°C]
3554	66,41	26,83	104,79	51,90	259,21
3409	66,62	26,83	104,97	52,07	241,37
3383	66,45	26,83	104,91	51,93	233,33
3358	66,42	26,83	104,60	51,96	276,04
3315	66,61	26,83	105,18	51,91	244,68
3251	67,29	26,83	104,84	52,51	287,68
3144	66,77	26,83	104,26	52,62	304,84
3127	66,38	26,83	104,55	52,19	287,48
3096	66,48	26,83	104,50	52,40	293,17
3053	69,23	26,83	104,58	52,52	412,38
2976	67,84	26,83	104,78	52,39	333,76
2973	68,58	26,83	104,24	52,20	390,60
2965	68,00	26,83	104,55	52,18	343,10
2948	70,54	26,84	105,62	52,38	476,23
2928	68,82	26,83	104,83	52,73	351,62
2805	72,49	26,84	105,99	52,70	507,55
2744	73,12	26,84	106,16	52,70	517,41
2645	73,00	26,84	106,39	52,69	532,35
2540	74,29	26,84	106,75	52,52	581,39
2460	76,57	26,85	107,76	51,96	582,41
2277	76,26	26,85	108,05	51,94	550,96
2112	76,74	26,85	108,19	51,89	539,70
1906	78,51	26,85	108,03	52,04	530,90
1674	77,82	26,85	108,02	51,99	527,79
1541	77,41	26,85	108,06	51,92	524,90
1471	78,93	26,85	108,27	52,36	441,72

Tabela I.5 - Temperaturas registradas no teste com B100.

Temperaturas – B100					
Vel. Rot. [rpm]	Temp. Culassa [°C]	Temp. Ambiente [°C]	Temp. Óleo [°C]	Temp. Ar Admissão [°C]	Temp. Gases Escape [°C]
3638	61,81	24,85	77,06	51,46	366,97
3558	64,76	24,86	84,96	51,65	467,57
3430	67,37	24,86	90,74	52,21	503,98
3337	68,56	24,87	94,59	51,68	509,66
3252	69,10	24,87	95,77	51,36	515,46
3175	69,21	24,88	96,57	51,20	516,34
3047	70,07	24,88	97,55	51,08	526,82
2946	72,03	24,89	98,78	51,66	532,93
2851	72,48	24,89	99,79	51,55	519,85
2743	72,67	24,90	100,03	51,87	520,87
2658	72,72	24,90	100,13	52,15	520,71
2601	74,07	24,91	100,93	52,00	524,50
2600	74,74	24,91	101,78	52,73	532,75
2587	74,79	24,91	101,24	51,99	527,30
2584	73,16	24,90	100,58	52,44	523,80
2554	74,83	24,96	103,90	51,81	566,41
2462	76,02	25,03	108,22	51,35	616,20
2352	76,13	25,05	109,12	51,51	594,86
2262	76,35	25,06	108,84	51,57	573,63
2139	76,70	25,06	108,68	51,49	549,66
2031	77,52	25,07	108,76	51,56	541,07
1878	78,35	25,07	108,86	51,65	534,84
1665	80,18	25,08	108,89	51,69	529,69
1527	80,77	25,08	108,91	51,58	527,69
1441	85,54	25,10	109,17	51,52	491,21

ANEXO J – EMISSÕES DE ESCAPE REGISTRADAS NOS TESTES EFETUADOS A CARGA MÁXIMA

Tabela J.1 - Emissões de escape registradas com gasóleo.

Emissões de Escape – Gasóleo				
Vel. Rotação [rpm]	O ₂ [%]	CO [ppm]	CO ₂ [%]	NO _x [ppm]
3646	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
3518	5,99	1626,00	8,51	1008,00
3457	5,99	1626,15	8,51	1008,07
3385	6,03	1602,91	8,48	1016,38
3433	6,01	1601,10	8,50	1026,13
3337	5,97	1678,59	8,52	1026,40
3235	6,02	1653,82	8,49	1033,58
3153	6,00	1793,53	8,50	1038,65
3044	5,73	2257,76	8,65	1027,97
2953	5,26	3128,01	8,92	1006,82
2837	3,70	703,59	3,34	386,18
2740	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2643	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2599	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2553	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2464	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2373	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2250	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2120	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2012	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1862	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1665	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1535	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1439	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D

Tabela J.2 - Emissões de escape registradas com B25.

Emissões de Escape – B25				
Vel. Rotação [rpm]	O₂ [%]	CO [ppm]	CO₂ [%]	NO_x [ppm]
3499	12,08	596,00	5,06	421,00
3638	11,18	533,54	5,56	522,74
3571	9,83	457,08	6,33	674,55
3618	9,32	451,40	6,62	712,50
3569	8,31	478,93	7,19	782,58
3442	7,35	647,90	7,74	876,53
3569	6,88	1099,47	8,00	923,59
3442	6,36	1890,38	8,29	934,39
3524	6,20	2198,44	8,39	940,56
3429	5,99	2457,28	8,50	938,13
3362	5,16	3345,02	8,98	917,06
3216	4,01	#DIV/0!	9,63	861,30
3433	3,33	832,00	10,01	798,38
3557	2,88	832,00	10,27	705,38
3492	7,00	#DIV/0!	7,94	577,35
3171	7,88	#DIV/0!	7,44	556,00
2565	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2603	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2719	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2815	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2629	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2752	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2858	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2681	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2863	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2770	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2992	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2850	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2967	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2833	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
3010	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2868	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2953	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2895	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
3042	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2964	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
3026	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2975	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2856	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2743	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D

2646	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2546	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2453	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2369	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2189	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1907	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1675	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1527	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1455	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D

Tabela J.3 - Emissões de escape registradas com B50.

Emissões de Escape – B50				
Vel. Rotação [rpm]	O ₂ [%]	CO [ppm]	CO ₂ [%]	NO _x [ppm]
3224	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2852	5,97	2749,10	8,52	949,99
2911	5,40	3943,13	8,83	946,23
3017	4,85	1057,41	9,15	924,71
3269	6,16	931,00	8,41	874,28
3028	15,37	#DIV/0!	3,25	511,80
2952	20,11	326,98	#DIV/0!	114,44
2893	20,60	89,75	#DIV/0!	55,11
2919	20,63	72,00	#DIV/0!	52,00
2893	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2963	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2855	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2618	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2827	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2767	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2837	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2914	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2863	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2717	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2542	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2466	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2364	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2245	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2132	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1987	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1780	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1553	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1459	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D

Tabela J.4 - Emissões de escape registradas com B75.

Emissões de Escape – B75				
Vel. Rotação [rpm]	O₂ [%]	CO [ppm]	CO₂ [%]	NO_x [ppm]
3224	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
3315	11,89	578,16	5,16	449,16
3409	11,67	541,64	5,28	481,91
3383	11,49	513,12	5,39	513,77
3554	11,20	489,31	5,55	557,00
3358	11,07	478,18	5,63	577,86
3127	10,82	461,86	5,77	614,36
3096	10,60	454,48	5,90	647,19
3144	9,47	454,71	6,54	743,73
3364	8,57	465,78	7,04	818,49
3251	8,30	490,63	7,20	845,56
2910	8,06	560,51	7,33	886,16
2863	7,41	916,08	7,70	928,43
2976	6,27	1972,61	8,34	934,28
2852	5,85	3057,58	8,58	932,47
2965	5,33	3503,41	8,88	926,24
2886	9,02	1982,00	6,79	786,52
2928	14,39	#DIV/0!	3,75	609,00
2735	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2850	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2973	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
3053	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2948	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2805	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2744	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2645	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2540	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2460	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2277	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2112	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1906	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1674	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1541	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1471	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D

Tabela J.5 - Emissões de escape registradas com B100.

Emissões de Escape – B100				
Vel. Rotação [rpm]	O₂ [%]	CO [ppm]	CO₂ [%]	NO_x [ppm]
3533	7,57	708,00	7,61	935,00
3638	7,75	855,42	7,51	957,52
3558	7,20	1349,23	7,82	962,69
3430	6,66	2097,04	8,13	963,50
3337	6,30	2699,73	8,33	954,61
3252	6,07	3151,95	8,46	953,42
3175	5,84	3796,11	8,59	944,26
3047	14,44	3146,83	4,47	505,00
2946	8,31	2180,30	7,46	666,64
2851	11,99	532,00	2,75	283,36
2743	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2658	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2584	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2601	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2587	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2600	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2554	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2462	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2352	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2262	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2139	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
2031	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1878	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1665	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1527	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1441	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D